

**Entwicklung und Optimierung eines neuen Verfahrens
zur grabenlosen Verlegung von Rohrleitungen
für den Energie- und Rohstofftransport**

Habilitationsschrift

zur Erlangung der Venia legendi für das Lehrgebiet

Spezialbohrtechnik

von

Dr.-Ing. Rüdiger Kögler

aus Hamm / Westfalen

vorgelegt der Fakultät für Energie- und Wirtschaftswissenschaften
der Technischen Universität Clausthal

Tag der Habilitation: 7. April 2008

I N H A L T

Seite

1	Einleitung	1
2	Bestehende Verfahren zur grabenlosen Rohrverlegung	6
2.1	Einteilung der Verfahren	6
2.1.1	Nichtsteuerbare Rohrverlegung mit Bodenverdrängung	7
2.1.2	Nichtsteuerbare Rohrverlegung mit Bodenentnahme	7
2.1.3	Steuerbare Rohrverlegung mit Bodenverdrängung	8
2.1.4	Steuerbare Rohrverlegung mit Bodenentnahme	8
2.2	Microtunneling (MT)	9
2.2.1	Verfahrensbeschreibung	9
2.2.2	Systemkomponenten	11
2.2.3	Technische Leistungsgrenzen	20
2.2.4	Wirtschaftliche Aspekte	26
2.2.5	Verfahrensbewertung	26
2.3	Horizontal Directional Drilling (HDD)	28
2.3.1	Verfahrensbeschreibung	28
2.3.2	Systemkomponenten	30
2.3.3	Technische Leistungsgrenzen	40
2.3.4	Wirtschaftliche Aspekte	44
2.3.5	Verfahrensbewertung	44
3	Zielvorgaben für neues Verfahren zur grabenlosen Rohrverlegung	46
3.1	Hintergrund	46
3.2	Technische Aspekte	49
3.2.1	Geometrische Leistungsgrenzen	49
3.2.2	Aspekte des Baugrunds	51
3.2.3	Einsetzbare Rohrmaterialien	54
3.3	Wirtschaftliche Aspekte	54
3.4	Zusammenfassung der Zielvorgaben	55

4	„Push & Pull - Technology“ (PPT)	56
4.1	Verfahrensbeschreibung	56
4.1.1	Pilotbohrung	56
4.1.2	Aufweitbohrung und Einziehvorgang	56
4.2	Systemkomponenten	58
4.2.1	Maschinentechnik	58
4.2.2	Infrastruktur	79
4.3	Feldversuche	80
4.3.1	Feldversuch 1 (April 2003)	85
4.3.2	Feldversuch 2 (Mai 2003)	87
4.3.3	Feldversuch 3 (Oktober 2003)	94
4.3.4	Zusammenfassung der Versuchsergebnisse	98
4.3.5	Schwachstellenanalyse	99
4.4	Wirtschaftliche Aspekte	130
4.5	Verfahrensbewertung	131
4.6	Ausblick	133
5	„Easy Pipe“ - Verfahren (EP)	135
5.1	Verfahrensbeschreibung	135
5.1.1	Bohrung	135
5.1.2	Einziehvorgang	136
5.2	Systemkomponenten	137
5.2.1	Maschinentechnik	137
5.2.2	Infrastruktur	148
5.3	Wirtschaftliche Aspekte	149
5.4	Verfahrensbewertung	151
5.5	Ausblick	153
6	Zusammenfassung	156

Anlagen	I
Abbildungsverzeichnis	II
Tabellenverzeichnis	VIII
Literaturverzeichnis	IX

1 Einleitung

Ein großer Teil der weltweiten Infrastruktur zur Rohstoff- und Energieversorgung sowie zur Abwasserentsorgung besteht heute aus Rohrleitungen bzw. Rohrleitungssystemen. Ohne funktionierendes Pipeline-Netzwerk wäre weder eine moderne Industriegesellschaft möglich, noch könnten Energieträger wie Öl und Gas aus ergiebigen Lagerstätten über große Entfernungen zu den jeweiligen Abnehmern transportiert werden.

Rohrleitungen können je nach Einsatzzweck aus Stahl, Polyethylen, Polypropylen, Glasfaserkunststoff, Beton und vielen weiteren Materialien bestehen. Die Pipelines werden dabei entweder direkt für den Transport von Gasen oder Flüssigkeiten eingesetzt oder dienen als Schutzrohre gegen mechanische Beschädigung für darin verlegte Energie- oder Nachrichtenkabel. Darüber hinaus existieren diverse Sonderanwendungen, wie beispielsweise als Röhrenspeicher oder zum Transport von Feststoffen.

Die Planung, der Bau und der Betrieb von Pipelines setzen umfangreiches Fachwissen in den Bereichen Engineering und Management voraus, obwohl der konventionelle Bau von Rohrleitungen (d.h. im offenen Rohrgraben) auf den ersten Blick einfach erscheinen mag (Abb. 1-1).



Abb. 1-1: Konventionelle Pipelineverlegung im offenen Rohrgraben [1-1].

Auf besonders exponierten Abschnitten wie z.B. bei Gewässerquerungen oder im Bereich von Sumpfgebieten ist eine effektive und sichere Verlegung mitunter extrem schwierig und nur mit außergewöhnlich hohem technischen und finanziellen Aufwand zu realisieren. Dabei wird nicht selten die Umwelt erheblich in Mitleidenschaft gezogen, was gerade in Zeiten zunehmender ökologischer Sensibilität in der Öffentlichkeit, enormen Druck auf die Bau- bzw. Betreiberfirmen ausübt (Abb. 1-2).



Abb. 1-2: Konventionelle Pipelineverlegung in schwierigem Gelände (Moorgebiet) [1-2].

Vor diesem Hintergrund wurden seit Mitte der siebziger Jahre unterschiedlichste Methoden zur grabenlosen Verlegung von Rohrleitungen (englisch: „No-Dig-Technologies“ oder „Trenchless Technologies“) entwickelt, um den Einsatz von Mensch und Maschine in topographisch schwierigen Abschnitten zu vermeiden und zusätzlich die Wirtschaftlichkeit der Rohrverlegung in diesen Bereichen zu optimieren. Insbesondere aber wegen der unbestreitbaren ökologischen Vorteile der grabenlosen Verlegetechniken für die unterschiedlichsten Rohrmaterialien, Verlegelängen, Baugrundbedingungen etc., gewinnen diese Methoden zunehmend an Bedeutung.

Im grabenlosen Großrohrleitungsbau haben sich im Wesentlichen das so genannte „Microtunneling“ (MT) und die „Gesteuerte Horizontalbohrtechnik“ (englisch: Horizontal Directional Drilling = HDD) als zuverlässige und weltweit etablierte Bauweisen erwiesen (Abb. 1-3 und 1-4).

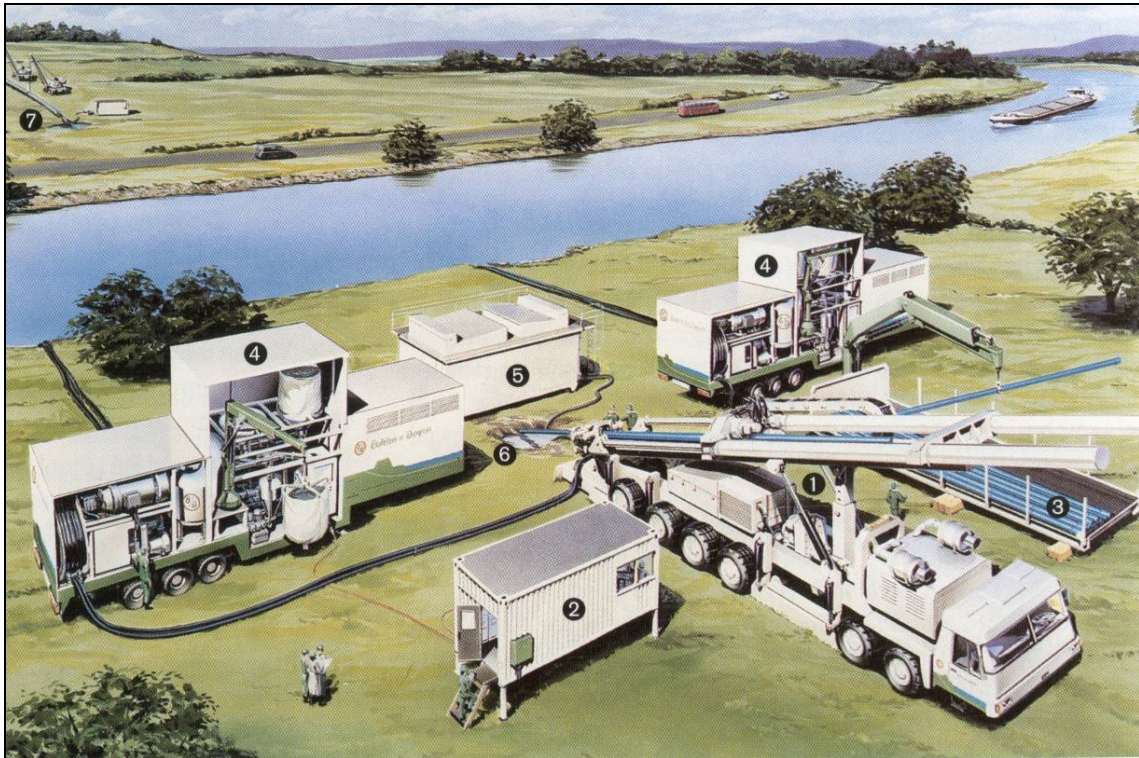


Abb. 1-3: Prinzipieller Baustellenaufbau beim HDD-Verfahren [1-4].

Diese Verfahren sind im Wesentlichen komplementär, d.h. sie sind jeweils auf spezifische Rahmenbedingungen (Rohrmaterial, Kreuzungslänge etc.) ausgerichtet und weisen nur relativ kleine „Projekt-Schnittmengen“ auf, in denen beide Verfahren gleichermaßen eingesetzt werden könnten und folglich in Konkurrenz zueinander ständen [1-5].

Im Bereich großer Rohrdurchmesser und großer Verlegelängen kommt dieser Interessenkonflikt noch am ehesten zum Tragen. Besonders bei schwierigen Baugrundbedingungen (Kiese, Steine, Gerölle) hat es beim Einsatz des wirtschaftlicheren HDD-Verfahrens in der Vergangenheit schwere Havarien bis hin zu Projektaufgaben gegeben. In einigen Fällen kam im Anschluss das Microtunneling, mit entsprechend höheren Kosten, zum Einsatz.

Vereinfacht dargestellt verbindet das HDD-Verfahren unter den beschriebenen, speziellen Rahmenbedingungen relativ günstige Baukosten mit einem relativ

großen Baurisiko, während sich der Sachverhalt beim MT-Verfahren genau umgekehrt darstellt, d.h. relativ geringes Baurisiko, aber hohe Baukosten.



Abb. 1-4: Prinzipieller Baustellenaufbau beim MT-Verfahren [1-3].

Die Aufgabenstellung dieser Arbeit umfasst deshalb die Entwicklung eines neuen Verfahrens zur grabenlosen Verlegung von Rohrleitungen unter Hindernissen (in schwierigen Böden), das das geringe Baurisiko des Microtunneling mit den relativ geringen Kosten des HDD-Verfahrens kombiniert.

Dazu werden in dieser Arbeit die grundsätzlichen Methoden der grabenlosen Rohrverlegung sowie deren prinzipiellen Unterscheidungskriterien einleitend vorgestellt. Anschließend werden die beiden Verfahren, auf denen das neue Verfahren im Wesentlichen basieren soll (Microtunneling und Horizontal Directional Drilling), in ihrem Verfahrensablauf, den Leistungsgrenzen sowie den spezifischen Vor- und Nachteilen detailliert vorgestellt (Kapitel 2).

Die Analyse der Schwachstellen beider etablierter Technologien führt dann zu den Entwicklungszielen für das neue Verlegeverfahren. Hierbei sind insbesondere die einsetzbaren Rohrmaterialien, die geometrischen Verlegeleistungen (Längen und Durchmesser), die Aspekte des Baugrunds sowie die Wirtschaftlichkeit von Bedeutung (Kapitel 3).

In einem ersten Ansatz hat die definierte Zielvorgabe zu der so genannten

→ ***PUSH & PULL - TECHNOLOGY*** (PPT-Verfahren)

geführt, die bereits in einem umfangreichen Feldversuch getestet werden konnte. Dabei wurden sowohl verfahrenstechnische als auch maschinentechnische Schwachstellen identifiziert, die momentan eine weitere Verfolgung dieses Lösungswegs als nicht ratsam erscheinen lassen. Es sollte jedoch erwähnt werden, dass einzelne maschinentechnische Komponenten, wie z.B. der Pipe Thruster, durch das PPT-Verfahren in ihrer technischen Entwicklung maßgeblich beschleunigt wurden.

Statt das PPT-Verfahren weiter zu entwickeln, wurde eine Verfahrensweise konzipiert, die im Folgenden als

→ ***EASY PIPE - Verfahren*** (EP-Verfahren)

bezeichnet wird und gegenüber dem PPT-Verfahren erhebliche Vorteile aufweist. Auch diese Verlegemethode wird hinsichtlich ihrer verfahrensspezifischen Abläufe, ihrer maschinentechnischen Komponenten sowie ihres abschätzbaren Anwendungspotentials detailliert beschrieben.

Abschließend werden die wesentlichen Aussagen und Ergebnisse dieser Arbeit in der Zusammenfassung verdichtet und kommentiert (Kapitel 6).

2 Bestehende Verfahren der grabenlosen Rohrverlegung

2.1 Einteilung der Verfahren

Die gegenwärtig eingesetzten Verfahren zur grabenlosen Rohrverlegung lassen sich nach diversen Merkmalen unterscheiden. So beispielsweise hinsichtlich der Steuerbarkeit, der Art und Weise des Bodenabbaus (Verdrängung oder Entnahme), der möglichen Verlegelängen und Rohrdurchmesser, des Einsatzes von Bohrspülung (z.B. Luft- oder Flüssigkeitsspülung), der Anzahl der Arbeitsschritte (Pilotbohrung, Aufweiten, Einziehen etc.) sowie weiterer Aspekte.

An dieser Stelle wird eine Unterscheidung nach den Kriterien gemäß [2-1] nach

- der Steuerbarkeit und
- dem Bodenabbau

vorgenommen. Diese grundsätzliche Unterscheidung ist in Abb. 2-1 dargestellt.

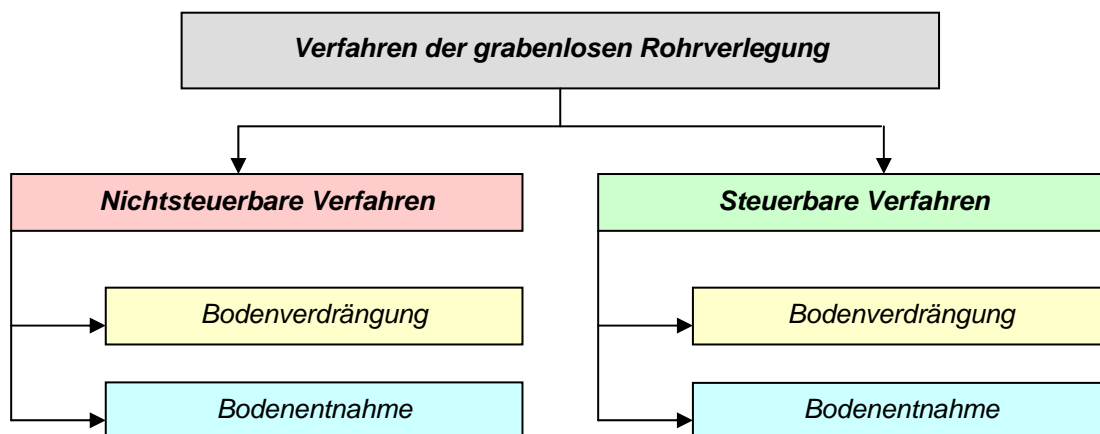


Abb. 2-1: Einteilung der Verfahren der grabenlosen Rohrverlegung.

In den folgenden Abschnitten werden die grundsätzlichen technischen Abläufe der vier wesentlichen Kombinationen

- nichtsteuerbar / Bodenverdrängung,
- nichtsteuerbar / Bodenentnahme,
- steuerbar / Bodenverdrängung sowie
- steuerbar / Bodenentnahme

anhand typischer Beispielfahrverfahren kurz beschrieben. Zudem werden die Leistungsgrenzen sowie die ggf. vorhandenen Einschränkungen hinsichtlich der Einsetzbarkeit (z.B. unter geologischen Gesichtspunkten) aufgezeigt.

2.1.1 Nichtsteuerbare Rohrverlegung mit Bodenverdrängung

Kennzeichnend für alle Verfahren dieser Klasse ist es, dass von einer Startbaugrube ein zylindrischer Verdrängungskörper statisch oder dynamisch geradlinig durch den anstehenden Baugrund bis in eine Zielbaugrube vorangetrieben wird. Der vor dem Verdrängungskörper anstehende Boden wird dabei während des Vortriebs in den unmittelbaren Umgebungsbereich des entstehenden Bohrlochs verdrängt. Die zu verlegende Rohrleitung folgt in der Regel unmittelbar dem Verdrängungskörper. Zu den typischen Verfahren dieser Klasse zählen u.a.:

- der ungesteuerte Verdrängungshammer (so genannte Erdrakete),
- die ungesteuerte Horizontalramme mit geschlossenem vorderen Rohrende,
- der ungesteuerter Pilotrohrvortrieb mit Verdrängungsspitze.

Die genannten Verfahren sind im Wesentlichen gekennzeichnet durch geradlinige Verlegung, relativ geringe Verlegeleistungen (Durchmesser bis ca. 180 mm und Längen bis ca. 25 m) sowie die Beschränkung auf verdrängungsfähigen Boden [2-1, 2-2, 2-3].

2.1.2 Nichtsteuerbare Rohrverlegung mit Bodenentnahme

Kennzeichnend für alle Verfahren dieser Klasse ist es, dass von einer Startbaugrube ein Rohr statisch oder dynamisch geradlinig durch den anstehenden Baugrund bis in eine Zielbaugrube vorangetrieben wird. Der vor dem Rohr anstehende Boden wird dabei während des Vortriebs (oder auch danach) gefördert. Die zu verlegende Rohrleitung kann direkt verlegt oder nach Erstellung des Bohrlochs nachträglich eingezogen werden. Zu den typischen Verfahren dieser Klasse zählen u.a. [2-2]:

- die ungesteuerte Horizontalramme mit offenem vorderen Rohrende,
- das ungesteuerte Pressbohrverfahren mit offenem vorderen Rohrende und
- das ungesteuerte Pressbohrverfahren mit Bohrkopf.

Die genannten Verfahren sind im Wesentlichen gekennzeichnet durch geradlinige Verlegung, mittlere Verlegeleistungen (Durchmesser bis maximal ca. 3.000 mm und Längen bis ca. 100 m) sowie die Einsatzfähigkeit in unterschiedlichsten Locker- und z.T. sogar Felsböden [2-4, 2-5].

2.1.3 Steuerbare Rohrverlegung mit Bodenverdrängung

Die nach dem Prinzip der Bodenverdrängung arbeitenden, steuerbaren Verfahren zur Rohrverlegung ähneln grundsätzlich den entsprechenden, ungesteuerten Verfahren. Abweichend von diesen, in den Abschnitten 2.1.1 und 2.1.2 erwähnten Verfahren, verfügen diese Methoden jedoch über Steuerelemente, die es in der ersten Phase ermöglichen, die Bohrung entsprechend einer vorher festgelegten Gradienten aufzufahren. Zu typischen Verfahren dieser Klasse zählen u.a. [2-2]:

- der steuerbare Verdrängungshammer,
- der steuerbarer Pilotrohrvortrieb mit Verdrängungsspitze und
- das steuerbares Pressbohrverfahren mit Verdrängungsspitze.

Diese Verlegemethoden sind im Wesentlichen gekennzeichnet durch Bohrungsdurchmesser bis ca. 700 mm und Vortriebslängen bis ca. 250 m, d.h. mittlere Verlegeleistungen.

2.1.4 Steuerbare Rohrverlegung mit Bodenentnahme

Auch bei den Verfahren der steuerbaren Rohrverlegung mit Bodenentnahme gibt es eine gewisse Ähnlichkeit in der prinzipiellen Arbeitsweise zu den in Abschnitt 2.1.2 beschriebenen, nichtsteuerbaren Verfahren. Typische Vertreter dieser Klasse sind [2-2]:

- das steuerbare Pressbohrverfahren mit Bohrkopf (Microtunneling = MT) und
- die steuerbare Horizontalbohrtechnik (Horizontal Directional Drilling = HDD).

Die genannten Verfahren MT und HDD zeichnen sich durch große Verlegeleistungen aus:

- MT: Länge bis ca. 500 m, Durchmesser bis ca. 2.000 mm und mehr
- HDD: Länge bis ca. 2.000 m, Durchmesser bis ca. 1.400 mm und mehr

Beide Verfahren eignen sich, um Bohrungen im Raumbogen aufzufahren und unterschiedlichste geologische Bedingungen zu bewältigen (mit gewissen Einschränkungen von Lockergesteinen bis zu Fels).

Da das Microtunneling und das HDD die wesentlichen Grundlagen für die Entwicklung des neuen Verlegeverfahrens PPT darstellen, werden sie in den Kapiteln 2.2 bzw. 2.3 näher erläutert.

2.2 Microtunneling

2.2.1 Verfahrensbeschreibung

Beim so genannten Microtunneling (gesteuerter Rohrvortrieb) handelt es sich um ein einphasiges Bauverfahren, bei dem das Bohrloch in einem Schritt in der gewünschten räumlichen Lage und in dem erforderlichen Volumen erbohrt wird. Der erstellte Hohlraum wird sofort mit den Produkt- bzw. Schutzrohren ausgefüllt.

Bei der üblichen Arbeitsweise (Abb. 2-2) werden zunächst zwei Schächte abgeteuft, der Startschacht und der Zielschacht. Im Startschacht wird die Pressvorrichtung, bestehend aus Pressrahmen und Vorschubzylindern, eingerichtet. Anschließend wird die Microtunnelmaschine (gebräuchliche Kurzform: Micromaschine) auf diesen Pressrahmen aufgelegt und von den Vorschubzylindern durch eine Öffnung in der Schachtwand ins Erdreich gedrückt. Für den Bohrprozess rotiert das Schneidrad am vorderen Ende der Micromaschine. Das gelöste Bohrklein wird im nachgeschalteten Kegelbrecher auf ein transportables Maß heruntergebrochen.

Anschließend wird von über Tage ein Vortriebsrohr auf den Pressrahmen aufgelegt und von den Vorschubzylindern gegen das hintere Ende der Micromaschine gedrückt. Zwischen beiden Bauteilen befindet sich eine Dichtung, die neben der Dichtfunktion (Grundwasserzutritt) auch die Auswirkungen hoher Punktlasten reduzieren soll.

Im Vortriebsrohr werden (bei hydraulischer Bohrkleinförderung) die Speise- und Förderleitungen für den Bohrspülungskreislauf verlegt und mit der Micromaschine verbunden. Die Bohrspülung, die in der Regel aus reinem Wasser oder einer Bentonit-Wasser-Suspension besteht, wird über Tage in speziellen Mischeinrichtungen erstellt und von Pumpen durch Rohrleitungen in den Schacht und von dort weiter zur Micromaschine gefördert. Am Schneidrad und im Brecherraum wird die Bohrspülung mit dem erbohrten Boden vermischt und anschließend über die Förderleitung zur Aufbereitungsanlage über Tage gepumpt.

Durch Messvorrichtungen (z.B. Laserstrahl oder Kreiselkompass) kann die exakte Position des Bohrkopfes jederzeit bestimmt werden. Notwendige Korrekturen der Bohrlinie werden über Steuerzylinder ausgeführt. Hierbei handelt es sich in der Regel um drei hydraulisch betätigte Zylinder, die separat angesteuert werden und

so die Arbeitsrichtung der Micromaschine verändern und den Erfordernissen anpassen können.

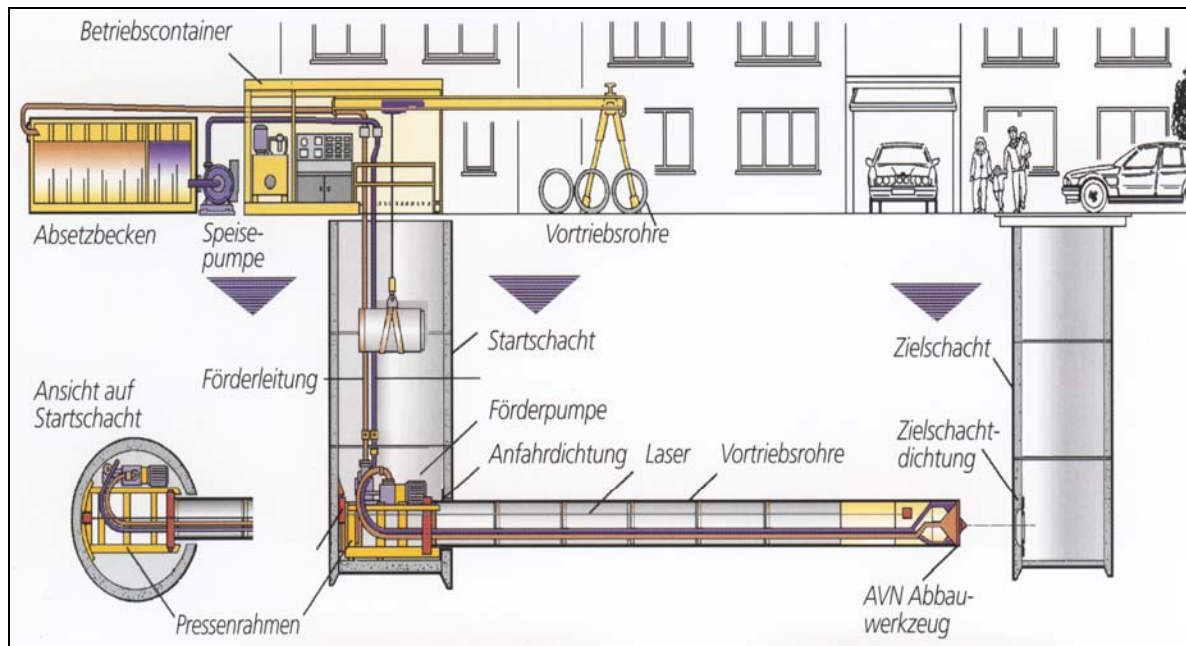


Abb. 2-2: Wesentliche Elemente beim Einsatz des Microtunneling [2-6].

Das Microtunneling wird hauptsächlich im Bereich der Abwassertechnik eingesetzt, da mit dieser Bauweise sehr hohe Verlegegenauigkeiten erreicht werden können. Diese liegen bei Einsatz der Laservermessung auch über große Längen im Millimeterbereich. Die geringen Verlegetoleranzen sind bei so genannten Gefälleleitungen erforderlich, in denen das Abwasser allein durch die Schwerkraft transportiert wird und sehr gleichmäßige, oftmals im Promillebereich liegende Gefälle, realisiert werden müssen.

Für andere Anwendungen wird es meistens erforderlich, in die verlegten Vortriebsrohre (die im Abwasserbereich identisch sind mit den Produktrohren) zusätzliche Rohre einzubauen, durch die später das gewünschte Medium transportiert werden kann. Dies ist z.B. bei Gashochdruckleitungen der Fall, bei denen in die (Beton)-Vortriebsrohre nachträglich eine Stahlrohrleitung eingezogen wird, durch die das Gas transportiert werden kann [2-7].

In diesem Fall wird das Microtunneling de facto zu einer zweiphasigen Arbeitsweise (Phase 1: Verlegung der Schutzrohre, Phase 2: Einzug der Produktrohrleitung in die Schutzrohre).

2.2.2 Systemkomponenten

Als wesentliche Systemkomponenten des Microtunnelings (siehe auch Abb. 2-2) können maschinentechnische Systemkomponenten sowie Systemkomponenten der erforderlichen Infrastruktur unterschieden werden. Diese werden nachfolgend kurz beschrieben.

Zu den maschinentechnischen Systemkomponenten des Microtunneling gehören u.a.:

- die Pressstation (Pressrahmen mit Vorschubzylindern),
- die Micromaschine (einschließlich Schneidrad und Brecher),
- die Betriebscontainer (Energieversorgung, Kranbahn und Steuerstand),
- das Vermessungssystem,
- die Bohrspülmischanlage (Kurzbezeichnung: Misanlage),
- die Bohrspülaufbereitungsanlage (Recyclinganlage),
- die Förder- und Speisepumpen,
- das Bentonit-Schmiersystem,
- die Vortriebsrohre sowie
- die Dehnerstationen.

Pressstation

Die aus Pressrahmen und Vorschubzylindern bestehende Pressstation befindet sich im Startschacht und wird hydraulisch mit Energie versorgt. Mitunter wird der Hub der eingesetzten Hydraulikzylinder durch spezielle Zwischenstücke verdoppelt, so dass sich längere Einzelrohre verlegen lassen (Abb. 2-3).

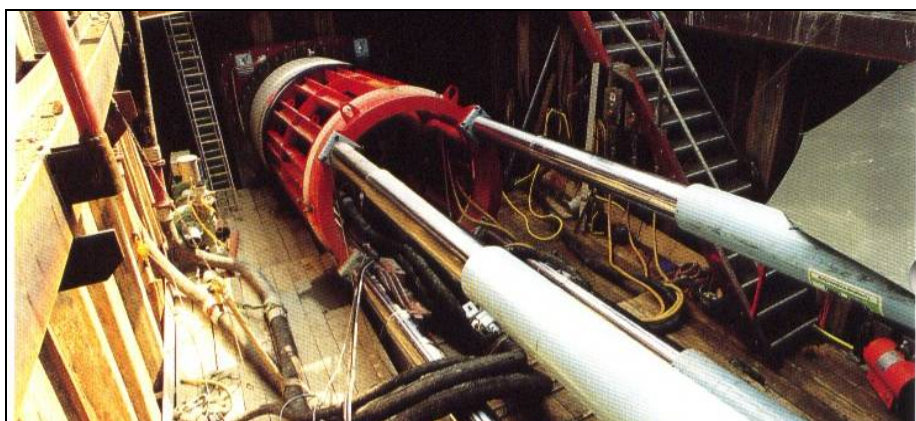
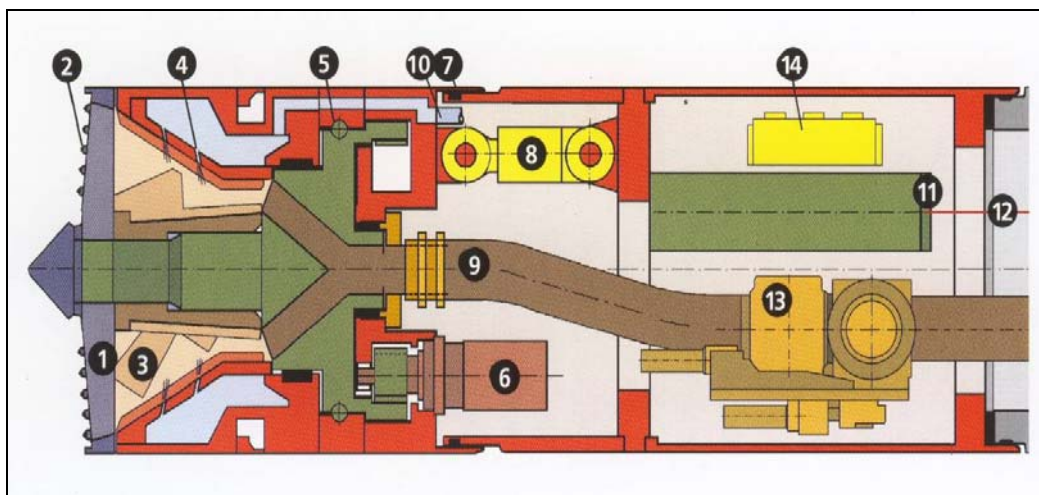


Abb. 2-3: Vorschubzylinder (maximale Vorschubkraft jeweils ca. 3.500 kN) im Startschacht während der Bohrarbeiten [2-8].

Micromaschine

Bei den Micromaschinen wird zwischen Nassförderern (Bohrkleintransport mittels Bohrspülung, Abb. 2-4) und Trockenförderern (Bohrkleintransport mittels Schnecke) unterschieden. Für die hier bearbeitete Aufgabenstellung sind nur Micromaschinen von Interesse, bei denen die Förderung des Bohrkleins mittels Bohrspülung erfolgt, da nur diese Bauart effektiv im Grundwasserbereich eingesetzt werden kann und die gewünschten Verlegelängen erreicht [2-1].



1 Schneidrad	5 Hauptlager	9 Förderleitung	13 Bypass
2 Werkzeuge	6 Hauptantrieb	10 Speiseleitung	14 Ventilblock
3 Brecher	7 Dichtung	11 Zieltafel	
4 Hochdruckdüsen	8 Steuerzylinder	12 Laserstrahl	

Abb.2-4: Schnitt durch eine Micromaschine mit Naßförderung [2-6].

Betriebscontainer

Vom Steuerstand im Betriebscontainer einer Micromaschine wird der gesamte Bohrprozess kontrolliert und gesteuert (Abb. 2-5). Hierzu verfügt der Maschinenfahrer über entsprechende Informationen hinsichtlich des Verlaufs der Bohrung sowie über maschinentechnische Parameter, wie das Drehmoment am Schneidrad, die erforderliche Vortriebskraft, die Position der Steuerzylinder, den Volumenstrom der Bohrspülung und verschiedenes mehr.

Eine weitere Funktion des Betriebscontainers besteht in der Energieversorgung der Micromaschine (hydraulische Energie). Zudem ist in diesen Containern, die in der Regel unmittelbar neben dem Startschacht positioniert werden (siehe auch Abb. 2-2), häufig auch eine Kranbahn montiert, um die Vortriebsrohre direkt vom

Lagerplatz aufnehmen und in den Schacht absenken zu können. Diese Zusatzvorrichtung findet sich hauptsächlich bei Rohrvortrieben mit kleinen Rohrdurchmessern.

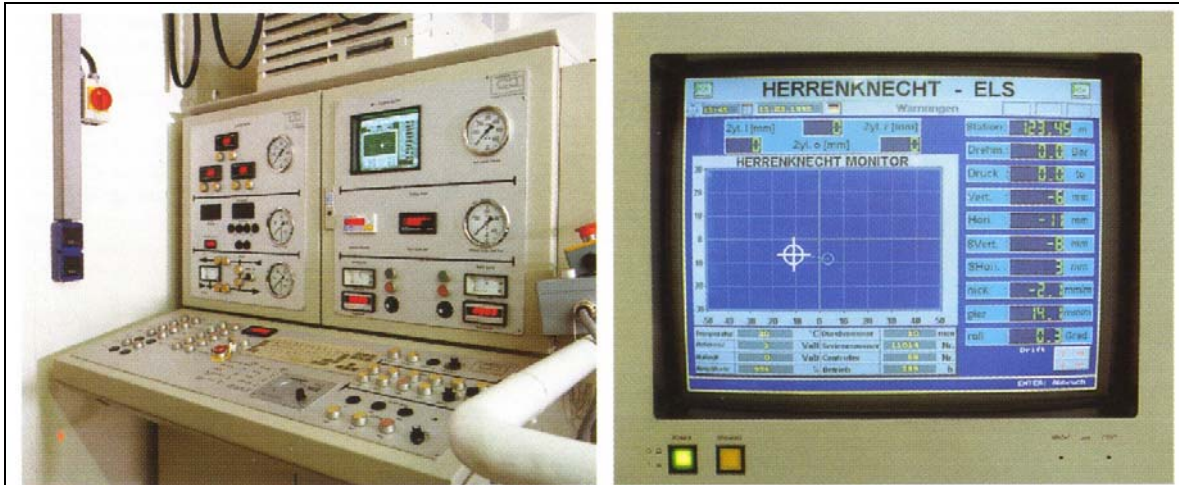


Abb. 2-5: Steuerstand und Display der Vermessungseinheit in einer Microtunnelmaschine der Fa. Herrenknecht AG, Schwanau [2-11].

Vermessungssystem

Für die Vermessungen von Microtunnel-Vortrieben werden im Wesentlichen Laser- und Kreiselkompassverfahren (Abb. 2-6) eingesetzt.

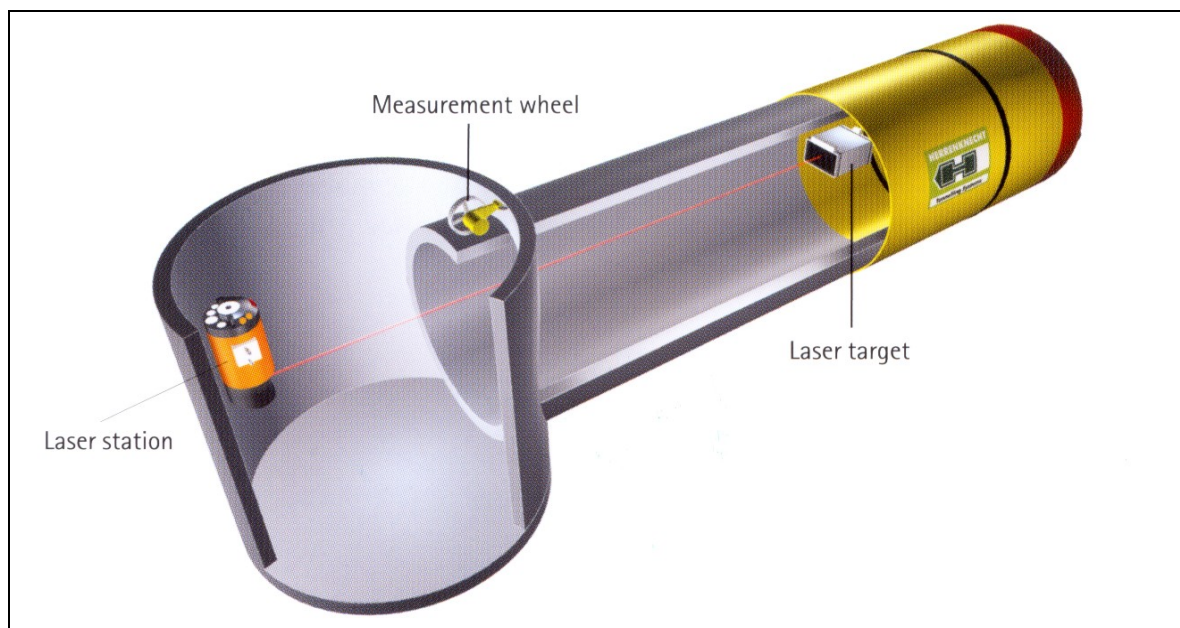


Abb. 2-6: Laservermessungssystem beim Microtunneling [2-12].

Die Laservermessungssysteme können in der Regel neben den jeweiligen X-Y-Koordinaten auch die Verrollung und Längsneigung der Micromaschine sowie den

horizontalen Richtungswinkel, die Maschinentemperatur und den Laserspotdurchmesser erfassen [2-9].

Zusätzlich gibt es Entwicklungen in der Automation des Bohrprozesses, durch die mit Hilfe der so genannten Fuzzy-Steuerung eine Entlastung des Maschinenfahrers und eine Vermeidung von Fehlbedienungen erreicht werden kann [2-10].

Unter bestimmten Bedingungen ist auch ein kurviger Bohrungsverlauf möglich, indem neben den üblichen Komponenten Laser und Zieltafel, Umlenk- und Vermessungssysteme aus Spiegeln und Theodoliten im Rohrrinneren eingebaut werden. Für diese Art der Bohrungsdurchführung sind jedoch hinsichtlich des Rohrquerschnitts bestimmte Mindestanforderungen erforderlich.

Mit dem Lasersystem können in Kombination mit Schlauchwasserwaagen Bohrungslängen bis zu etwa 400 m realisiert werden, wobei jedoch ab ca. 150 m aufgrund der Streuung des Laserstrahls sowie den Turbulenzen im Rohr (Temperatureinflüsse etc.) zunehmend Qualitätseinbußen bei den Vermessungsergebnissen auftreten.

Jüngste Entwicklungen, die auch schon erfolgreich in der Praxis erprobt wurden, sehen den Einsatz von Kreiselkompassen bei der Vermessung des Bohrungsverlaufs vor. Dieses System wird sich insbesondere bei stark kurvigen Bohrungsverläufen oder bei Rohren mit geringen Innendurchmessern als vorteilhaft erweisen [2-9].

Bohrspülmischanlage

In der Bohrspülmischeinrichtung wird der Grundflüssigkeit (Wasser) für den Bohrprozess Bentonit zugemischt, um die Tragfähigkeit der Suspension zu erhöhen (besserer Bohrkleintransport, geringere Gefahr von Verstopfen) sowie die entstehende Reibung an der Rohraußenseite während des Bohrprozesses zu vermindern (Abb. 2-7).

Da die Bohrspülung beim Microtunneling in einem gut kontrollierbaren Kreisprozess geführt wird, sind sowohl die Umlaufmengen als auch die auftretenden Verluste relativ gering. Aus diesem Grund reichen in der Regel kleinere Mischeinrichtungen für die Durchführung des Bohrprozesses aus.



Abb. 2-7: Typische Mischeinrichtung für das Microtunneling-Verfahren [2-13].

Recyclinganlage

In der Aufbereitungs- oder Recyclinganlage wird der mit Bohrklein beladene Bohrspülungsstrom gereinigt und erneut dem Kreislauf zugeführt. Zur Reinigung sind im einfachsten Fall, bei einer reinen Wasserspülung, Absetzbecken ausreichend. Bei größeren Bohrungen und beim Einsatz von Bentonit-suspensionen werden effektive Recyclingeinheiten (Abb. 2-8) erforderlich.

Die Kapazität dieser Einheiten muss dem Volumenstrom im Kreislauf angepasst sein, um sicherzustellen, dass keine noch mit Bohrklein beladene Bohrspülung in die Förderleitung gelangt.



Abb. 2-8: Größere Recyclinganlage im Baustelleneinsatz .

Förder- und Speisepumpe

Die Zirkulation der Bohrspülung während des Bohrprozesses wird mittels stufenlos verstellbarer Kreiselumpen erreicht. In der Regel wird mit zwei Pumpen gearbeitet. Die übertägig aufgestellte Speisepumpe transportiert die frische Bohrspülung vom Mischtank über Rohrleitungen bis zur Micromaschine, wo der Spülungsstrom im Brecherraum und am Schneidrad austritt und sich mit dem gelösten Bohrklein vermischt. Diese mit Bohrklein angereicherte Suspension wird anschließend von einer Förderpumpe, die unmittelbar hinter der Micromaschine oder im Startschacht angeordnet ist, nach über Tage zur Aufbereitungsanlage gepumpt. Dort wird die Bohrspülung vom Bohrklein gereinigt und wieder verwendet.

Der Volumenstrom im Spülungskreislauf liegt bei etwa 60 bis 150 m³/h, wobei die erforderlichen Drücke gering sind (wenige bar). Aus diesem Grund sind relativ leistungsschwache Pumpenantriebe von ca. 30 bis 50 kW für die genannten Förderleistungen ausreichend.

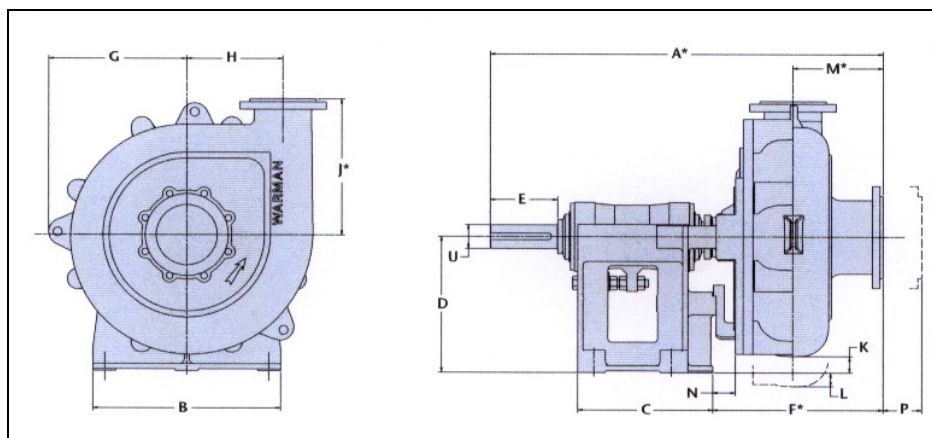


Abb. 2-9: Typisches Layout einer Kreiselpumpe zur Förderung von Bohrspülung (mit und ohne Cuttings) [2-14].

Bentonit-Schmiersystem

Um die teilweise erhebliche Oberflächenreibung zwischen Rohraußenseite und Bohrlochwand während der Bohrarbeiten zu reduzieren, werden häufig besondere Bentonit-Schmiersysteme eingesetzt, die in bestimmten Abständen in die Vortriebsrohre integriert werden (Abb. 2-10).

Mit Hilfe dieser Schmiersysteme können die Vortriebskräfte in einer Größenordnung von etwa 50% reduziert werden [2-1]. In einigen Fällen, bei teilweise sehr

langen Vortrieben, wurde die Durchführung von Projekten erst durch geeignete Schmiersysteme möglich.

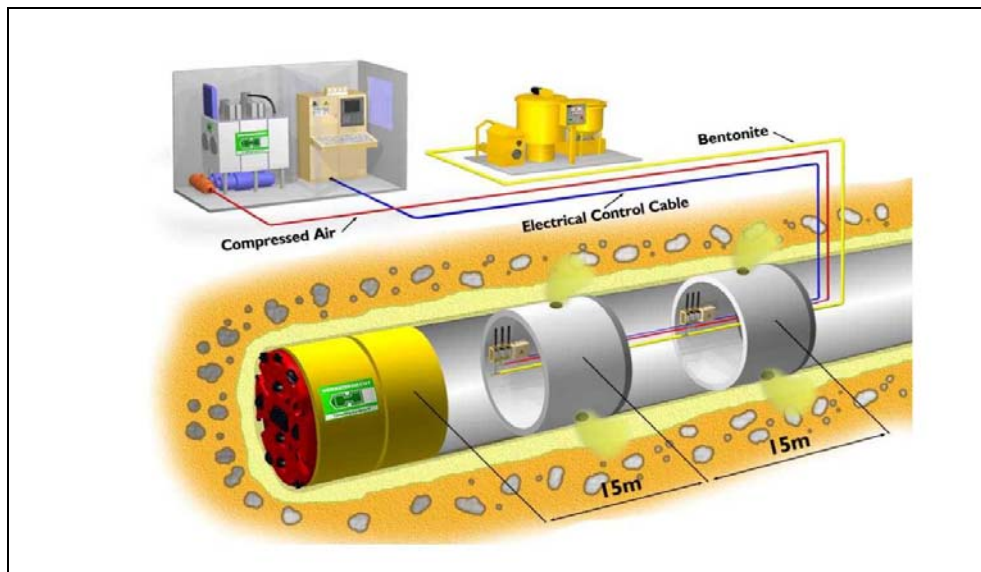


Abb. 2-10: Prinzipielle Anordnung der Systemkomponenten von Bentonit-Schmiersystemen beim Microtunneling [2-15].

Vortriebsrohre

Die Vortriebsrohre bestehen in der Regel aus Beton oder Faserzement und werden während des Vortriebs nicht kraftschlüssig miteinander verbunden, d.h. sie können nur Druckkräfte übertragen, jedoch keinerlei Zugkräfte aufnehmen (Abb 2-11).

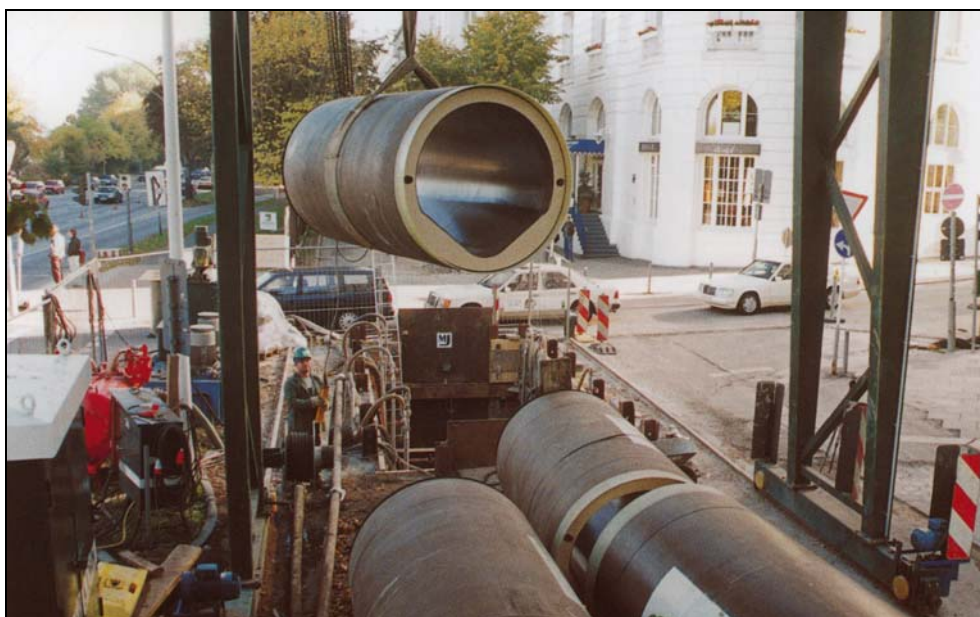


Abb. 2-11: Polycrète-Vortriebsrohre während der Verlegung [2-16].

Dehnerstationen

Sollten die erforderlichen Vorschubkräfte trotz des Einsatzes der oben beschriebenen Schmiersysteme zu hoch werden und damit die Stabilität der Vortriebsrohre gefährden, so können spezielle Dehnerstationen in den Rohrstrang integriert werden. Der Abstand zwischen zwei Dehnerstationen variiert in Abhängigkeit der geologischen Bedingungen bzw. der jeweiligen rohrstatischen Aspekte und liegt in der Regel zwischen etwa 80 bis 200 m [2-1].

Diese auch als Zwischenpressstationen bezeichneten Einheiten bestehen aus Vorschubzylindern, die gleichmäßig verteilt zwischen zwei speziellen Vortriebsrohren im Schutze eines Stahlrings angebracht sind (Abb. 2-12).

Teile der Zwischenpressstationen (z.B. Hydraulikzylinder) können in der Regel nach erfolgreicher Rohrverlegung durch manuellen Ausbau zurückgewonnen werden.

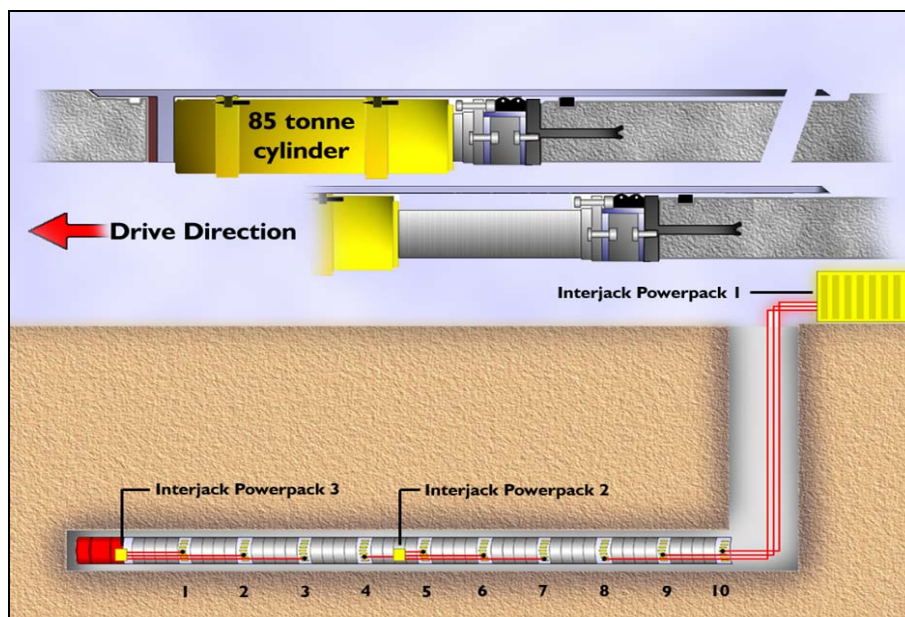


Abb. 2-12: Prinzipieller Einsatz von Dehnerstationen im Rohrstrang [2-15].

Neben den beschriebenen, elementaren maschinentechnischen Komponenten kommen beim Microtunneling spezifische Anforderungen an die Baustelleninfrastruktur hinzu. In diesem Zusammenhang sind

- die Arbeitsfläche (besonders im Bereich des Startschachtes) und
- der Start- und Zielschacht

zu nennen.

Arbeitsfläche im Bereich des Startschachtes

Die erforderliche Einrichtungsfläche für die Maschinen, Geräte und Materialien am Startschacht ist mit ca. 250 bis 1.000 m² relativ klein und auf den kompakten Spülungskreislauf, die geringe Zahl an Einzelkomponenten sowie die geringe installierte Leistung zurückzuführen (Abb. 2-13). Darüber hinaus kann diese Fläche durch den modularen Aufbau in Bezug auf die Längen- und Breitenverhältnisse flexibel gestaltet werden.

Durch die kompakte Bauweise lassen sich außerdem die Emissionen vor Ort so weit reduzieren, dass auch Einsätze im Innenbereich von Städten im Allgemeinen unproblematisch sind.



Abb. 2-13: Wesentliche maschinentechnische Komponenten der grabenlosen Rohrverlegung mittels Microtunneling [2-6].

Start- und Zielschacht

Verfahrensbedingt wird beim Microtunneling in der Mehrzahl der Anwendungsfälle die Erstellung von Start- und Zielschächten erforderlich. Diese sehr zeit- und kostenintensive Vorbereitung einer adäquaten Infrastruktur für den Einsatz des Microtunneling hat allerdings auch Vorteile, da die Bohrungen in der Regel auf kürzest möglicher Strecke und mit ausreichender Deckung realisiert werden können.

Neben den üblichen Rundschächten werden auch Rechteckschächte, ovale Schächte und polygonförmige Schächte erstellt (Abb. 2-14). Die dabei erreichten Tiefen liegen z.T. über 50 m.



Abb. 2-14: Spezieller Startschacht in Polygonform für die grabenlose Rohrverlegung mittels Microtunneling [2-6].

2.2.3 Technische Leistungsgrenzen

Hinsichtlich der Leistungsgrenzen von Rohrverlegeverfahren sind folgende Aspekte von besonderem Interesse:

- Geometrische Leistungsgrenzen (Längen, Durchmesser)
- Aspekte des Baugrunds
- Einsetzbare Rohrmaterialien

Geometrische Leistungsgrenzen

Die geometrischen Leistungsgrenzen des Microtunneling, d.h. die erreichbaren Vortriebslängen in Abhängigkeit des jeweiligen Rohrdurchmessers, sind in Abb. 2-15 dargestellt.

Zu erwähnen ist in diesem Zusammenhang die Bedeutung des Begriffs Rohrennenweite, die oftmals mit dem Rohrinne Durchmesser gleichgesetzt wird und demzufolge, insbesondere bei den dickwandigen Betonvortriebsrohren, erheblich größere Bohrlochdurchmesser bedingt. So weist z.B. ein Polycrret-Vortriebsrohr

der Nennweite 1.200 mm einen Außendurchmesser von 1.482 mm auf, was einen Schneidraddurchmesser > 1.500 mm erfordert.

Um eine Vergleichbarkeit mit der Horizontalbohrtechnik zu erreichen, wird nachfolgend jeweils der Rohraußendurchmesser des Produktrohrs betrachtet. Dies ist auch deshalb sinnvoll, weil den Bauherren in erster Linie der Durchmesser der zu verlegenden Rohrleitung interessiert und weniger der Bohrlochdurchmesser. Dabei ist hier der Außendurchmesser relevant, da für die neu zu entwickelnde Verlegemethode insbesondere Stahlrohre von Interesse sind. Bei Stahlrohren wird jedoch üblicherweise der Außendurchmesser als charakteristische Dimension angegeben.

1500															
1400															
1300															
1200															
1100															
1000															
900															
800															
700															
600															
500															
400															
300															
200															
100															
Produktrohr-Ø (mm)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500
Rohrlänge (m)															

Abb. 2-15: Prinzipielle, vereinfachte Darstellung der Abhängigkeit von Rohrlänge (= Bohrungslänge) und Rohrdurchmesser beim Microtunneling bei der (nachträglichen) Verlegung von Stahlproduktrohren [2-18, 2-22].

= gut geeignet
 = bedingt geeignet
 = nicht geeignet

Die in Abb. 2-15 dunkelblau dargestellten Bereiche zeigen die Einsatzgrenzen ohne Werkzeugwechsel im Bohrloch. Durch die Option des Werkzeugwechsels (hellblauer Bereich in Abb. 2-15) lassen sich die erreichbaren Bohrlochlängen zwar erheblich vergrößern, hierzu sind jedoch besondere Micromaschinen mit manueller Zugangsmöglichkeit zum Schneirad erforderlich. Diese Sondermaschinen sind relativ groß (minimaler Schneidraddurchmesser etwa 1.500 mm) und eignen sich deshalb aus wirtschaftlichen Gründen, aufgrund der erforderlichen großen Schutzrohre und der bei kleinen Produktrohrleitungen schlechten

Ausnutzung dieser Schutzrohre nur bedingt für kleine Produktrohrleitungen [2-1, 2-33, 2-34, 2-35, 2-36, 2-37].

Im Zusammenhang mit der Verlegung von Stahlrohren mittels Microtunneling werden somit insbesondere vier Aspekte deutlich.

1. Die maximalen Rohrdurchmesser zur Leitungsverlegung mittels MT können > 1.500 mm sein.
2. Bedingt durch den erforderlichen Krümmungsradius der Stahlrohrleitung sowie den erforderlichen Überdeckungen unter den Hindernissen sind in Abhängigkeit vom Rohrdurchmesser bestimmte Mindestlängen für die Verlegung erforderlich (allerdings können diese kürzer als beim HDD sein).
3. Die erreichbaren Verlegelängen (ohne Werkzeugwechsel) sind eher gering (< 500 m). Mit Werkzeugwechsel (und Dehnerstationen, Schmier-systemen etc.) können Verlegelängen > 1.000 m realisiert werden, jedoch ist hierzu ein Mindestbohrlochdurchmesser von ca. 1.500 mm erforderlich.

Aspekte des Baugrunds

Hinsichtlich der Einsetzbarkeit in unterschiedlicher Geologie weist das Microtunneling eine nahezu maximale Spannweite auf. Durch Anpassung des Schneidrades und der Fördertechnik auf bestimmte Baugrundbedingungen lässt sich dieses Verlegeverfahren annähernd in jedem Locker- und Festgestein einsetzen (Abb. 2-16).

Ein besonders positives Merkmal des Microtunnelings im Zusammenhang mit Baugrundbedingungen ist die Möglichkeit, mit dieser Technik relativ problemlos einzelne Steine oder Blöcke während des Bohrbetriebs bewältigen zu können.

Diese Fähigkeit ist insbesondere von den Faktoren Schneidraddurchmesser und Schneidradausbildung abhängig (Abb. 2-16). Als Richtwert kann der maximale Durchmesser eines Einzelhindernisses mit etwa 1/3 des Schneidraddurchmessers angenommen werden.

Um eine Vergleichbarkeit mit anderen Verlegemethoden, insbesondere dem HDD, zu ermöglichen, wird nachfolgend eine Zuordnung der beherrschbaren Bodenarten anhand der relevanten Baugrundtypen für die hier untersuchten Einsatzzwecke vorgenommen.



Abb. 2-17: Prinzipielle, vereinfachte Darstellung der Einsatzbereiche des Microtunnelings in

 = gut geeignet = bedingt geeignet = nicht geeignet

☐ = nicht geeignet

Die folgenden, wesentlichen Ergebnisse lassen sich aus Abb. 2-17 ableiten:

1. Das Microtunneling ist grundsätzlich in allen Durchmesserbereichen für die Baugrundarten Ton, Sand und Kies geeignet.
2. Ab einem bestimmten Minstdurchmesser (abhängig von der maximalen Steingröße des Bodens) lassen sich auch Gerölle und Einzelhindernisse mittels Microtunneling bewältigen.
3. Auch Fels ist grundsätzlich für den Einsatz des MT-Verfahrens geeignet.

Einsetzbare Rohrmaterialien

Für Rohrbaumaßnahmen können die unterschiedlichsten Rohrmaterialien verwendet werden. Neben den spezifischen Anforderungen in der Betriebsphase (z.B. Aggressivität des Produktmediums gegenüber der Rohrwand etc.) sind auch schon in der Bauphase bestimmte Parameter zu beachten, anhand derer eine Vorauswahl geeigneter Rohrmaterialien getroffen werden muss, da nicht alle Materialien für den Einsatz bei allen Verlegemethoden geeignet sind. Im Hinblick auf die hier untersuchte Aufgabenstellung ist die Betrachtung der vier gängigen Rohrmaterialien PEHD, Stahl, Guss und Beton sinnvoll [2-22].

PEHD ist ein Werkstoff mit relativ geringer Festigkeit und hoher Temperaturabhängigkeit, wobei hohe Temperaturen die Festigkeit negativ beeinflussen. Dafür zeichnet sich PEHD durch absolute Korrosionsbeständigkeit, hohe Flexibilität (kleine Kurvenradien) und die Möglichkeit aus, sowohl Druck- als auch Zugkräfte aufnehmen zu können. Die Verbindung einzelner Rohrabschnitte erfolgt über besondere Schweißungen.

Stahl ist grundsätzlich korrosionsgefährdet (was mitunter eine relativ kurze Lebensdauer bedingen kann) und weniger flexibel als PEHD. Gemeinsam ist beiden Werkstoffen die Eigenschaft, sowohl Druck- als auch Zugkräfte übertragen zu können. Auch Stahlrohre werden mittels Schweißung miteinander verbunden.

Gegenüber Stahlrohren zeigen Gussleitungen eine höhere Flexibilität (Kurvengängigkeit). Darüber hinaus kann die Verbindung einzelner Rohrabschnitte über spezielle Klemmen relativ schnell und einfach erfolgen. Gussrohre können mit sehr hohen Druckkräften belastet werden, jedoch wird die Zugkraftübertragung durch die Festigkeit der Klemmverbindungen begrenzt.

Beton (und betonähnliche Werkstoffe) sind in der Regel nur einseitig auf Druck zu

belasten. Zugkräfte führen schnell zur Zerstörung des Materialverbundes. Auch Beton zeigt gegenüber bestimmten, aggressiven Medien eine große Anfälligkeit. Die Verbindung einzelner Rohrabschnitte zu einer Rohrleitung erfolgt in der Regel über Formschluss bzw. über eine zwischen den Einzelrohren angebrachte, auf Druck belastete Zwischenlage (Dichtung, z.B. aus Holz).




Eine Bewertung der beschriebenen Rohrmaterialien hinsichtlich ihrer Verwendbarkeit im Microtunneling führt zu den in Abb. 2-18 gezeigten Ergebnissen.

In dem hier betrachteten Zusammenhang interessiert besonders das Rohrmaterial Stahl. Als nachteilig ist beim Einsatz von Stahlrohren im Microtunneling die langwierige und anspruchsvolle Verbindung einzelner Rohre (vorrichten, schweißen, prüfen, umhüllen etc.) zu nennen. Darüber hinaus weist ein verschweißter Stahlrohrstrang eine hohe Eigenfestigkeit auf und folgt dementsprechend oftmals nur bedingt den an der Micromaschine eingeleiteten Steuerbewegungen. Aus diesem Grund werden Stahlrohre vorzugsweise geradlinig verlegt [2-1].

Die einzelnen Stahlrohre werden im Allgemeinen in Längen von 12 bis 16 m hergestellt und an die Baustelle geliefert. Dies bedingt in der Folge sehr große Schachtabmessungen mit allen damit verbundenen Nachteilen (Kosten, Zeitaufwand etc.).

Material	Einstufung	Bemerkung
PEHD		Geringe Druckfestigkeit
Stahl		Hohe Biegesteifigkeit
Guss		Hohe Druckfestigkeit
Beton		Hohe Druckfestigkeit

Abb. 2-18: Einsetzbarkeit unterschiedlicher Rohrmaterialien für die Verlegung mittels Microtunneling.

 = geeignet  = indifferent  = ungeeignet

Als wesentliche Ergebnisse lassen sich aus Abb. 2-18 ableiten:

1. Der Einsatz von Stahl im Microtunneling ist aus technischen, logistischen und wirtschaftlichen Gründen nur eingeschränkt bzw. mittels eines weiteren Arbeitsschritts (Einziehen der Produktrohre in Schutzrohre) möglich.
2. Beton (oder ähnliche Materialien) und Guss sind aus heutiger Sicht die am besten für den Einsatz im Microtunneling geeigneten Materialien.

2.2.4 Wirtschaftliche Aspekte

Bei der allgemeinen Diskussion der wirtschaftlichen Aspekte von einzelnen Verlegeverfahren machen in der Regel zu viele Imponderabilien eine belastbare, allgemein gültige Aussage unmöglich.

Grundsätzlich hat die Baustelleneinrichtung und die Bohrungsvorbereitung (Schachtbauwerke, Rüstzeiten etc.) beim Microtunneling einen erheblichen Einfluss auf die Projektkosten. Diese Kosten können in ihrer Summe sogar die reinen Bohrkosten übertreffen. Dies ist beim HDD grundsätzlich anders.

Hinzu kommen, z.B. bei der hier näher untersuchten Verlegung von Stahlrohren in Schutzrohren, die Kosten für Antransport und Material der Schutzrohre selbst sowie der zusätzliche Aufwand für das Einziehen der Produktrohrleitung in den Schutzrohrstrang.

2.2.5 Verfahrensbewertung

Eine Analyse der beschriebenen Verfahrenseigenschaften führt zu den, in der folgenden Verfahrensbewertung aufgeführten, positiven und negativen Aspekte:

Positive Aspekte:

- Sehr hohe Verlegegenauigkeit erreichbar.
- Universelle Einsetzbarkeit in unterschiedlichen, auch schwierigen Böden gegeben.
- Gute Kontrolle des Bohrspülungskreislaufs möglich (durch gezielte Zu- und Abfuhr der Bohrspülung von der Ortsbrust).
- Kleine Bohrspülmengen erforderlich.
- Relativ geringe Anforderungen an die Qualität der Bohrspülung erforderlich.
- Relativ geringe Überdeckungen unter Hindernissen möglich (ca. 2-facher Bohrlochdurchmesser).

Negative Aspekte:

- Hoher Aufwand für die Baustelleneinrichtung durch die Schachtbauwerke notwendig.
- Längenbegrenzung der Bohrungen aus technischen Gründen, insbesondere bei kleinen Rohrdurchmessern.

- Bei großen Verlegelängen und kleinen Produktrohrdurchmessern zunehmend unwirtschaftliches Verfahren, da ein sehr großes Bohrlochvolumen erforderlich ist.
- Nur bedingte Eignung des Rohrwerkstoffes Stahl für die Verlegung (keine direkte Verlegung sinnvoll, nur unter Einsatz von Schutzrohren und zusätzlichem Arbeitsschritt realistisch).
- Aufwendige Vermessungsarbeiten während der Bohrungsdurchführung notwendig, wenn eine sehr hohe Verlegegenauigkeit erreicht werden soll (z.B. für Gefälleleitungen).

2.3 Horizontal Directional Drilling

2.3.1 Verfahrensbeschreibung

Bei der als Horizontal Directional Drilling (HDD) bezeichneten steuerbaren Horizontalbohrtechnik wird von einem übertägig aufgestellten Bohrgerät ein Bohrkopf entlang einer vorgegebenen (i.A. „bananenförmigen“) Trasse vorangetrieben.

Dabei erfolgt die Übertragung der vom Bohrgerät übertägig erzeugten Andruckkraft sowie des erforderlichen Drehmomentes über das Bohrgestänge. Die jeweilige Position des Bohrkopfes wird mittels einer direkt hinter dem Bohrkopf befindlichen Sonde (i.d.R. unter Ausnutzung des Erdmagnetfeldes) festgestellt und via Kabel zum Steuerstand geleitet. Durch die leistungsfähige, aus der Tiefbohrtechnik übernommene Messtechnik ist diese Methode praktisch für alle Teufenbereiche geeignet. Der Boden wird bei dieser Technik zum geringen Teil verdrängt und zum größten Teil von der durch Düsen am Bohrkopf austretenden Bohrspülung gelöst und nach über Tage transportiert.

Der typische Verfahrensablauf einer Horizontalbohrung im oberflächennahen Bereich gliedert sich in die drei Arbeitsphasen

- Pilotbohrung,
- Aufweitbohrung(en) und
- Einziehvorgang.

Diese drei Einzelphasen werden nachfolgend beschrieben.

Pilotbohrung

Zu Beginn der Pilotbohrung wird ein am vorderen Ende des Bohrstranges angebrachter Bohrmeißel von der Bohranlage in einem vorher festgelegten Eintrittswinkel ins Erdreich gedrückt. Dabei wird die aus einer Bentonit-Suspension bestehende Bohrspülung durch das Gestänge zu den Meißeldüsen gepumpt und tritt dort unter hohem Druck aus. Die jeweilige Position der sich hinter dem Meißel befindlichen Messsonde wird über ein, im Inneren des Stranges verlaufendes Kabel, in den Steuerstand übertragen und dort ausgewertet.

Bei sehr langen Bohrungen kann es erforderlich werden, den Pilotbohrstrang durch ein so genanntes Überwaschgestänge (bzw. Casingrohr) zu stabilisieren.

Hierbei handelt es sich um eine zusätzliche Rohrtour, die drehend über den Pilotbohrstrang geschoben wird und diesen entlastet und stabilisiert (Abb. 2-19).

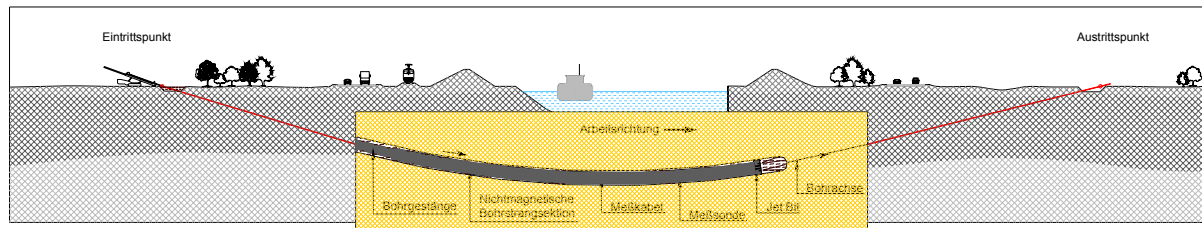


Abb. 2-19: Prinzipielle Darstellung der Pilotbohrung beim HDD-Verfahren [2-24].

Aufweitbohrung(en)

Nachdem die gesteuerte Pilotbohrung am Zielpunkt wieder zutage getreten ist, werden der Bohrmeißel und die Messsonde entfernt und ein Räumer vorgebaut. Hierbei handelt es sich um ein Bohrwerkzeug zum Aufweiten des Bohrkanals auf einen größeren Durchmesser. Der Räumer wird drehend und spülend von der Austrittsseite zur Bohranlage zurückgezogen. (Abb. 2-20). Dieser Vorgang wird so oft mit größeren Räumerdurchmessern wiederholt, bis das Bohrloch den vorgesehenen Enddurchmesser erreicht hat.

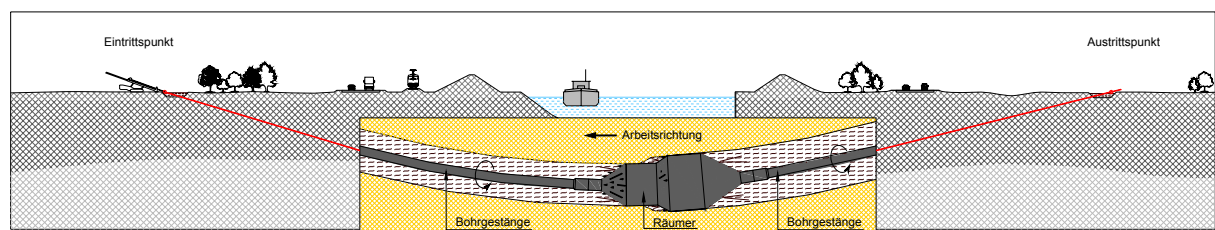


Abb. 2-20: Prinzipielle Darstellung der Aufweitbohrung beim HDD-Verfahren [2-24].

Einziehvorgang

Als letzter Arbeitsschritt bei der Durchführung einer steuerbaren Horizontalbohrung wird die in einem Strang vorbereitete Rohrleitung in das fertig aufgeweitete Bohrloch eingezo-gen (Abb. 2-21).

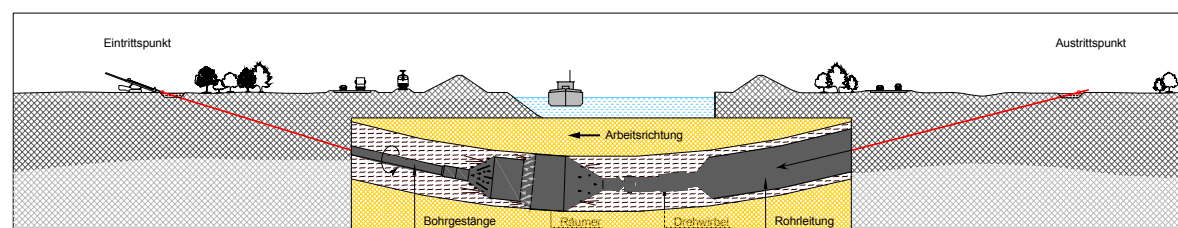


Abb. 2-21: Prinzipielle Darstellung des Einziehvorgangs beim HDD-Verfahren [2-24].

Das HDD-Verfahren (Grossbohrtechnik) wird hauptsächlich im Bereich der Öl- und Gasindustrie, der chemischen Industrie sowie bei der Verlegung großer Wasserleitungen eingesetzt. Kennzeichnend für diese Anwendungen ist es, dass die Produkte (Öl, Gas, Wasser etc.) unter Druck durch die Pipeline gepumpt werden.

Wesentlich seltener und darüber hinaus technisch nicht unumstritten ist die Verlegung von Gefälleleitungen im Abwasserbereich mittels HDD. Hier sind verfahrensbedingte Vorbehalte (Messgenauigkeit, Überschnitt des Räumers etc.) gegen den Einsatz anzuführen, insbesondere bei sehr kleinen Gefällen im Promillebereich [2-25].

Ein weiterer Anwendungsbereich, hier allerdings eher im Bereich der Kleinbohrtechnik angesiedelt, ist die Verlegung von Schutzrohren im HDD-Verfahren. Diese können anschließend mit Nachrichten, Steuer- oder Energiekabeln belegt werden (z.B. Glasfasernetze für das Internet).

2.3.2 Systemkomponenten

Als wesentliche Systemkomponenten des HDD-Verfahrens können wiederum maschinentechnische Systemkomponenten und Systemkomponenten der erforderlichen Infrastruktur genannt werden.

Zu den maschinentechnischen Systemkomponenten des Horizontal Directional Drilling zählen u.a.:

- das Bohrgerät,
- das Power Pack (Energieversorgung),
- der Steuerstand,
- das Vermessungssystem,
- die Hochdruckpumpe,
- die Bohrspülmischanlage (übliche Bezeichnung: Mischanlage),
- die Bohrspülaufbereitungsanlage (Recyclinganlage),
- das Bohrgestänge (mit Gestängelager) sowie
- die Bohrwerkzeuge.

Die genannten Komponenten werden nachfolgend detailliert beschrieben.

Bohrgerät

Horizontalbohrgeräte bestehen im Wesentlichen aus einem Stahlrahmen und einem darauf montierten, beweglichen Bohrschlitten. Dieser Bohrschlitten überträgt die für den Bohrprozess notwendigen Kräfte und Drehmomente auf den Bohrstrang. Der Stahlrahmen lässt sich über Stützen einseitig in seiner Neigung einstellen. Dies ist erforderlich, um den für das jeweilige Bohrprofil vorgesehenen Eintrittswinkel realisieren zu können.

Der Stahlrahmen kann als selbsttragende Konstruktion oder auf Rad- oder Kettenlaufwerken aufgebaut sein (Abb. 2-22). Bei sehr großen Bohrgeräten kommt mitunter auch eine modulare Bauweise zum Einsatz, um die Transportgewichte und -abmessungen zu reduzieren.



Abb. 2-22: 250-t Horizontalbohrgerät der Fa. Herrenknecht AG auf Sattelaufleger.

Horizontalbohrgeräte werden im Allgemeinen nach ihrer maximalen Zugkraft unterteilt. Dabei haben sich die in der nachfolgenden Tabelle 2-1 dargestellten Begriffe und Leistungsklassen etabliert.

Tab. 2-1: Gängige Unterscheidung der HDD-Bohrgerätegrößen (Rig = Bohrgerät).

Bezeichnung	Zugkraft (kN)	Drehmoment (kNm)	Gewicht (t)
Micro-Rigs	< 100	< 10	< 10
Mini-Rigs	100 - 250	10 - 25	10 - 20
Midi-Rigs	250 - 1.000	25 - 50	20 - 40
Maxi-Rigs	1.000 - 2.500	50 - 100	40 - 60
Mega-Rigs	> 2.500	> 100	> 60

Power Pack

Fast alle Horizontalbohranlagen sind energietechnisch autark, d.h. sie sind nicht auf eine externe Energieversorgung (z.B. Stromnetz) angewiesen, sondern erzeugen ihre Energie in eigenen Power Packs. Dort wird in der Regel die von Dieselmotoren erzeugte Primärenergie in elektrische oder hydraulische Energie umgewandelt und den jeweiligen Verbrauchern über Strom- bzw. Hydraulikleitungen zugeführt (Abb. 2-23). Je nach Einsatzort und -bedingungen werden etwa ein bis drei (oder mehr) Power Packs erforderlich.



Abb. 2-23: Power Pack mit ca. 1.000 kW installierter Leistung.

Steuerstand

Die Bedienung einer Horizontalbohranlage erfolgt über den Steuerstand. Hier befindet sich der Arbeitsplatz des Bohrmeisters (Abb. 2-24), von dem aus der Bohrprozess (Kräfte, Drehmomente, Pumpraten etc.) gesteuert und kontrolliert wird.



Abb. 2-24: Steuerstand einer 300-t Bohranlage.

Die Steuerstände großer Horizontalbohrgeräte sind meistens in separaten 20ft Containern untergebracht. In diesen Räumlichkeiten ist zudem ein Arbeitsplatz für den Bauleiter (Tool Pusher) und den Vermesser (Surveyor) vorgesehen.

Vermessungssystem

Das beim HDD hauptsächlich eingesetzte Vermessungssystem basiert wie die Festgesteinswerkzeuge auch auf Vorlagen aus der Tiefbohrtechnik (Magnetic Guidance System, Abb. 2-25). Dabei wird prinzipiell eine Positionsbestimmung mit Hilfe des Schwerkraftfelds der Erde (Azimut) sowie des Erdmagnetfelds (Inklination) vorgenommen.

Zur Verbesserung der Genauigkeit der Positionsbestimmung kann in oberflächen-nahen Bereichen zusätzlich ein künstliches Magnetfeld, das so genannte Coil, ausgelegt werden.

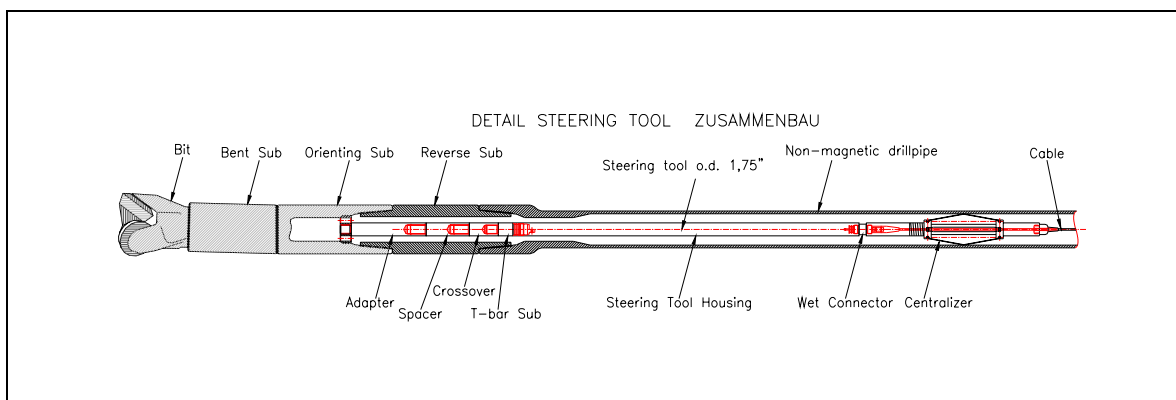


Abb. 2-25: Wesentliche Elemente eines Magnetic Guidance Systems (oben) sowie Position der Messsonde im Bohrstrang (unten) [2-28, 2-29].

Der Einsatz von Kreiselkompass-Systemen ist beim HDD eher selten und in der Regel auf Lokationen mit starken magnetischen Einflüssen beschränkt (z.B. unter Bahnhöfen etc.).

Hochdruckpumpe

Um die Bohrspülung zu den Meißeldüsen verpumpen zu können, werden besondere Hochleistungspumpen verwendet (Abb. 2-26). Diese müssen einerseits sehr hohe Volumenströme der mitunter viskosen Bohrspülung verpumpen können (bis zu ca. 4 m³/min) und andererseits ausreichende Druckhöhen ermöglichen, um die Druckverluste in den übertägigen Zuleitungen, im Bohrgestänge und an den Meißeldüsen zu überwinden (insgesamt z.T. > 100 bar). Entsprechend groß sind die installierten Leistungen von bis zu jeweils ca. 500 kW.

Die erforderliche Energie wird in der Regel primär von Dieselmotoren erzeugt, die diese Energie entweder direkt mechanisch (über Getriebe) an die Pumpe abgeben oder über eine hydraulische Pumpe-Motor-Kombination weiterleiten (Vorteil: stufenlose Drehzahlregulierung). Elektrische Motoren finden im HDD-Bereich seltener Anwendung.

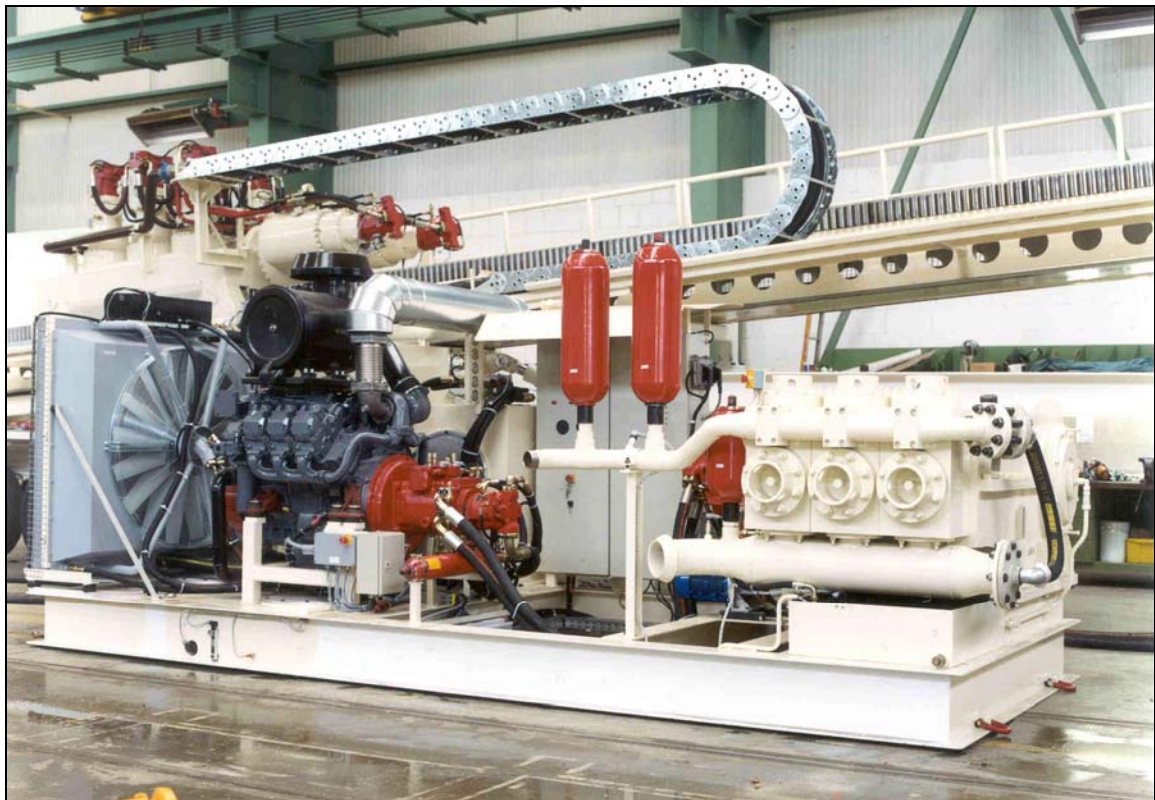


Abb. 2-26: Hochdruck-Spülpumpe mit dieselhydraulischem Antrieb ohne Schallschutz.

Bohrspülmischanlage

In der Bohrspülmischanlage wird wie beim Microtunneling auch die Grundflüssigkeit (in der Regel Wasser) mit Bentonit und/oder chemischen Zusatzstoffen versetzt, um die rheologischen Eigenschaften der Suspension den spezifischen Bedingungen des Bohrprozesses bzw. der angetroffenen Geologie anzupassen.

Das Bentonit wird in den meisten Fällen in Big Bags angeliefert und über geeignete Mischvorrichtungen, wie z.B. Venturi-Düsen, der Grundflüssigkeit zugesetzt (Abb. 2-27). In selteneren Fällen werden auch Silos mit Bentonit aufgestellt. Dies ist jedoch nur bei sehr großen Bohrprojekten bzw. bei Bohrungen mit totalen Spülungsverlusten und demzufolge hohem Bentonitbedarf üblich.



Abb. 2-27: Bohrspülmischeinrichtung mit einer Mischkapazität von ca. 550 l/min [2-26].

Bohrspülaufbereitungsanlage

Die Recyclinganlagen (Abb. 2-28) erfüllen die gleichen Aufgaben wie beim Microtunneling. Lediglich der Volumenstrom ist mitunter deutlich höher (bis zu ca. $4 \text{ m}^3/\text{min} = 240 \text{ m}^3/\text{h}$).



Abb. 2-28: Recyclinganlage zur Aufbereitung von Bohrspülung [2-27].

Bohrgestänge (mit Gestängelager)

Das Bohrgestänge spielt beim HDD-Prozess eine sehr wichtige Rolle. Es überträgt die erforderlichen Druck- und Zugkräfte sowie die Drehmomente und ermöglicht die gezielte Zuleitung der Bohrflüssigkeit unter hohem Druck zu den Abbauwerkzeugen.

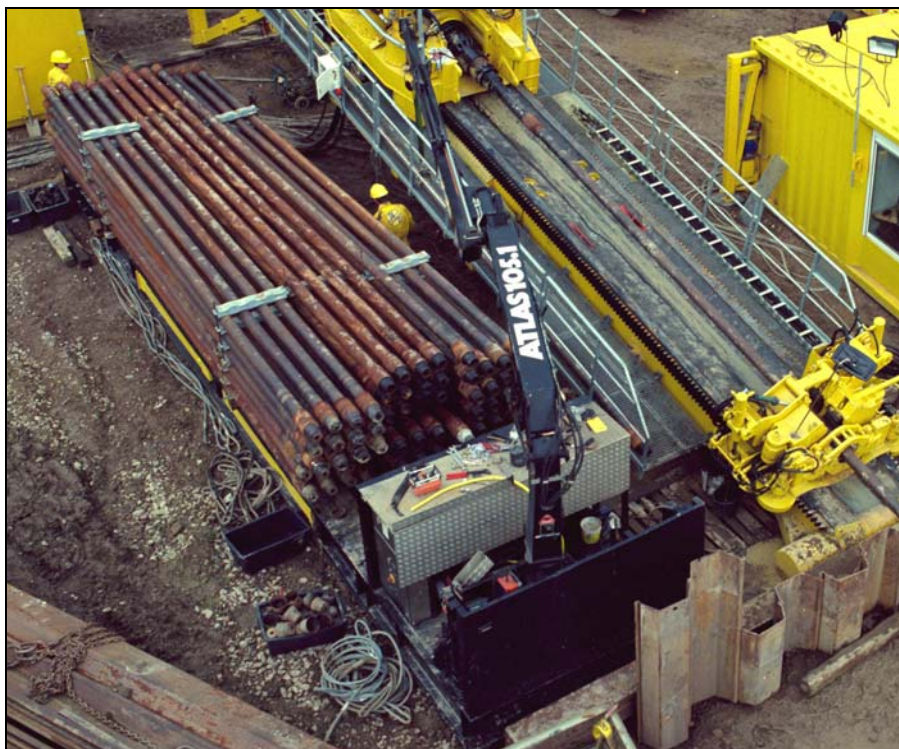


Abb. 2-29: Bohrgestänge auf Bohrgestängelager mit Kran.

Bei großen Horizontalbohrprojekten wird fast ausschließlich mit Ölfeldbohrgestänge nach API-Richtlinien gearbeitet. Dabei kommen hauptsächlich hochwertige Gütestufen und Stähle zum Einsatz (z.B. S-135), da insbesondere die bei HDD-Bohrungen anfallenden Drehmomente erheblich höher sind als bei normalen Tiefbohrungen.

Zur effektiven Handhabung (Lagerung, Gestängewechsel beim Ein- bzw. Ausbauen etc.) werden die einzelnen Bohrstangen häufig in Gestängelagern (Skids) abgelegt (Abb. 2-29).

Bohrwerkzeuge

Hinsichtlich der Bohrwerkzeuge kann beim HDD-Verfahren eine Unterscheidung anhand der Arbeitsschritte Pilotbohrung und Aufweitbohrung vorgenommen werden. Weiterhin muss unterschieden werden zwischen Lockergesteinswerkzeugen und Festgesteinswerkzeugen.

Während die Festgesteinswerkzeuge große Ähnlichkeit mit den Bohrwerkzeugen aus der Tiefbohrtechnik aufweisen (Rollenmeißel, Hole Opener, Abb. 2-30), sind die für weichere Formationen (Ton, Sand etc.) vorgesehenen Werkzeuge speziell für die Bedingungen in der Horizontalbohrtechnik entwickelt worden (Jet Bits, Barrel Reamer, Fly Cutter).



Abb. 2-30: Einsatz eines Hole Openers im Festgestein (Brasilien, 2001).

Hinsichtlich der HDD-spezifischen Infrastruktur sind u.a. folgende Komponenten zu erwähnen:

- Widerlager (für Bohranlage),
- Spülungsbecken und
- Spülungsrückführleitung.

Widerlager (für Bohranlage)

Um die hohen Druck- und Zugkräfte vom Bohrgerät sicher auf den Boden übertragen zu können, reicht das Eigengewicht dieser Bohrgeräte (ca. 40 bis 70 t) oftmals nicht aus. Hierzu sind besondere Widerlager erforderlich, die in unterschiedlicher Art und Weise ausgeführt werden können (Stahlträger, Spundwände, Betonklötze etc.).

Bewährt haben sich in der Praxis so genannte Spundwände (Abb. 2-31), deren Dimensionierung (Tiefe, Breite) den spezifischen Baugrundbedingungen angepasst werden kann und die horizontale Kräfte von mehr als 4.000 kN aufnehmen können.



Abb. 2-31: Widerlager aus Spundwänden vor Maxi-Bohrgerät (2.000 kN).

Spülungsbecken

Für die Durchführung großdimensionierter Horizontalbohrungen, bei denen das Bohrlochvolumen mehrere tausend Kubikmeter erreichen kann, sind sehr große Bohrspülmengen erforderlich. Um diese sicher und effizient handhaben zu können, werden zusätzlich zu den Spülungstanks (Container) Speicherbecken mit großem Speichervolumen erforderlich.

Diese Speicherbecken werden möglichst nah an den Aufbereitungsanlagen positioniert und dienen zur Aufnahme der noch mit Cuttings beladenen Bohrspülung. Bei Ausfall oder Überlastung der Recyclinganlagen sowie für den Rohreinzug wird die mit Bohrklein beladene Bohrspülung in die Speicherbecken umgeleitet und zu einem späteren Zeitpunkt gereinigt bzw. entsorgt.

Die Speicherbecken stellen häufig eine Schwachstelle der HDD-Technik dar, da sie sehr große Flächen in Anspruch nehmen und aufgrund ihres temporären Charakters oftmals nur unzureichend abgesichert werden (Abb. 2-32).



Abb. 2-32: Bohrspülungsbecken neben einer Horizontalbohranlage.

Spülungsrückführleitung

Während des Bohrprozesses tritt auch an der Pipesite sehr viel Bohrspülung zu Tage. Diese muss zurück zur Bohranlage transportiert oder direkt entsorgt werden. Der Transport erfolgt in der Regel über so genannte Returnleitungen. Dabei handelt es sich um temporäre Rohrleitungen, die auf kürzest möglichem Weg von der Pipe- zur Rigsite verlegt werden (Abb. 2-33).

Die verpumpte Bohrspülung wird meistens an der Pipesite vorgereinigt (Entnahme der groben Bestandteile), während die Feinreinigung auf der Rigsite erfolgt. Der Durchmesser solcher Returnleitungen liegt etwa bei 6 Zoll (ca. 150 mm).



Abb. 2-33: Spülungsrückleitung zur Bohranlage (rechts im Bild).

2.3.3 Technische Leistungsgrenzen

Auch das HDD-Verfahren wird hinsichtlich seiner technischen Leistungsgrenzen im Weiteren nach den folgenden Aspekten bewertet:

- Geometrische Leistungsgrenzen (Längen, Durchmesser),
- Aspekte des Baugrunds und
- einsetzbare Rohrmaterialien.

Geometrische Leistungsgrenzen

Die geometrischen Verlegeleistungen im HDD, die Bohrungslänge in Abhängigkeit des Rohrdurchmessers, sind in Abb. 2-34 dargestellt.

Es ist an dieser Stelle zu erwähnen, dass die dargestellte, erreichbare Bohrungslänge in Abb. 2-34 auf 1.500 m begrenzt wurde. Dies hat den Hintergrund, dass für die neue Verfahrenstechnik insbesondere der Längenbereich 500 bis 1.500 m

von Interesse ist. Darüber hinausgehende Bohrungslängen sind mit dem HDD in üblicher Verfahrensweise möglich (z.B. 2.308 m, 10 Zoll Stahlrohr, China 2001 [2-30, 2-31]). Noch größere Längen sind durch das Zusammenführen zweier Pilotbohrungen (Meeting-in-the-Middle-Verfahren) realistisch (z.B. 2.626 m, 12 Zoll, Deutschland 2005). Des Weiteren wurden durch den Verfasser dieser Arbeit bereits Machbarkeitsstudien für ca. 3.000 m lange Bohrungen erstellt [2-32].

1500															
1400															
1300															
1200															
1100															
1000															
900															
800															
700															
600															
500															
400															
300															
200															
100															
Produktrohr-Ø (mm)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500
Rohrlänge (m)															

Abb. 2-34: Prinzipielle, vereinfachte Darstellung der Abhängigkeit von Rohrlänge (= Bohrungslänge) und Rohrdurchmesser beim HDD [2-1, 2-22, 2-38, 2-39].

= gut geeignet
 = bedingt geeignet
 = nicht geeignet

Aus Abb. 2-34 sind insbesondere folgende Erkenntnisse abzuleiten:

1. Der maximale Rohrdurchmesser zur Leitungsverlegung mittels HDD beträgt z.Z. etwa 1.400 mm (1.500 mm erscheinen unter günstigen Bedingungen realisierbar zu sein).
2. Bedingt durch den erforderlichen Krümmungsradius der Stahlrohrleitung sowie den erforderlichen Überdeckungen unter den Hindernissen sind in Abhängigkeit des Rohrdurchmessers bestimmte Mindestlängen für die Verlegung erforderlich.
3. Kleinere Produktrohrleitungen lassen sich mittels HDD über größere Längen verlegen als größere Rohrleitungen.
4. Die maximal erreichbaren Verlegelängen liegen für kleinere Rohrdurchmesser bei > 1.500 m Bohrungslänge.

Aspekte des Baugrunds

Hinsichtlich der Einsetzbarkeit in unterschiedlichen Böden ist die HDD-Technik wesentlich stärker eingeschränkt als das Microtunneling. Grundsätzlich geeignet sind feinkörnige, bindige Bodenarten, da diese in der Regel eine gute Lösbarkeit und eine hohe Bohrlocheigenstabilität aufweisen (z.B. sandig-schluffiger Ton etc.).

Ebenfalls geeignet sind die meisten Felstypen, solange sie nicht klüftig sind (Spülungsverluste!) oder zu viele abrasive Bestandteile, wie z.B. Quarz, aufweisen (Werkzeugverschleiss). Als Richtwert hinsichtlich der einaxialen Druckfestigkeit kann angenommen werden, dass Fels bis zu ca. 250 N/mm² für die HDD-Technik beherrschbar ist.

Das größte Problem in felsigem Baugrund stellen große Bohrlochdurchmesser dar. Unter diesen Bedingungen treten oftmals sehr hohe Drehmomente am Bohrwerkzeug auf, die die Gefahr des Gestängebruchs erhöhen. Zudem lassen sich die Bohrwerkzeuge (Hole Opener) in großen Bohrlöchern nur schwer zentrieren, was sich wiederum stark verschleißend auf die Gestängelebensdauer auswirkt.

Grundsätzlich sind beim HDD rollige, grobkörnige Böden wie z.B. runder, gleichförmiger Kies ohne bindige Bestandteile, schwer beherrschbar. In einem derartigen Baugrund ist mit starken Spülungsverlusten durch die typischen, hohen K-Werte zu rechnen. Außerdem ist die Bohrlochstabilität nach Durchgang des Räumwerkzeugs sehr gering. Dies führt häufig zu Bohrlocheinstürzen und damit zum Festwerden des Bohrgestänges bzw. der einzuziehenden Rohrleitung. Die angesprochene Problematik verschärft sich mit zunehmendem Bohrlochdurchmesser (Abb. 2-35).

Fels																
Gerölle, Steine																
Kies																
Sand																
Ton																
Bodenart	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500	
Rohrdurchmesser (außen, in mm)																

Abb. 2-35: Prinzipielle, vereinfachte Darstellung der Einsatzbereiche des HDD in Abhängigkeit vom Baugrund.

= gut geeignet
 = bedingt geeignet
 = nicht geeignet

Folgende, wesentliche Erkenntnisse lassen sich aus Abb. 2-35 ableiten:

1. Von den betrachteten Baugrundarten sind Ton und Sand am besten das HDD geeignet.
2. Grobkörnige, kiesige Böden lassen sich nur stark eingeschränkt mittels HDD bewältigen. Dies gilt insbesondere für steigende Rohrdurchmesser.
3. Gerölle und Steine sind grundsätzlich ein Problem für den Einsatz des HDD.
4. Kleinere Rohrdurchmesser sind gut geeignet für felsigen Baugrund, große Rohrdurchmesser sind als eher ungeeignet einzustufen (Zentrierung der Bohrwerkzeuge, Drehmomentübertragung etc.).




Einsetzbare Rohrmaterialien

Beim HDD können verfahrensbedingt nur zugfeste Rohrmaterialien eingesetzt werden, da die Rohre beim Verlegevorgang in das vorbereitete Bohrloch eingezogen und nicht eingeschoben werden. Demzufolge scheidet Beton aus der untersuchten Produktpalette (PEHD, Stahl, Guss, Beton) als Werkstoff aus.

Die übrigen Materialien sind gut (PEHD, Guss) bis sehr gut (Stahl) geeignet. Einschränkungen bei PEHD und Guss sind insofern erforderlich, als die maximal übertragbare Zugkraft deutlich geringer ist als bei geschweißten Stahlrohren. Dies macht sich bei den genannten Materialien insbesondere bei großen Bohrlochdurchmessern und/oder großen Bohrungslängen bemerkbar. Stahlrohre werden nur aufgrund der materialbedingten Mindestverlegeradien in ihrer Eignung eingeschränkt. Werden die Mindestverlegeradien nicht eingehalten, führt dies zu Spannungen im Material und damit zum Versagen des Rohres während der Verlegung oder im nachfolgenden Betrieb (Abb. 2-36).

Material	Einstufung	Bemerkung
PEHD		Zugfestigkeit, Hohe Flexibilität
Stahl		Sehr hohe Zugfestigkeit
Guss		Zugfestig. d. Muffen, Muffendurchm.
Beton		Geringe Zugfestigkeit

Abb. 2-36: Einsetzbarkeit unterschiedlicher Rohrmaterialien für die Verlegung mittels HDD.

 = geeignet  = indifferent  = ungeeignet

Als wesentliche Ergebnisse aus Abb. 2-36 lassen sich vor dem Hintergrund der Aufgabenstellung dieser Arbeit (Fokus auf das Material Stahl) die folgenden Punkte ableiten:

1. Stahl als Rohrmaterial eignet sich hervorragend für den Einsatz in der HDD-Technik.
2. Beton ist wegen fehlender Zugfestigkeit ungeeignet.
3. PEHD und Guss sind gut bis sehr gut geeignet.

Erreichbare Verlegeleistungen

Für die Einschätzung der Netto- bzw. Gesamtbohrzeit gelten sinngemäß die gleichen Anmerkungen wie beim Microtunneling, wobei zu beachten ist, dass die Gesamtdauer eines Projektes, aufgrund des Wegfalls der Schachtbauwerke, in der Regel beim HDD kürzer ist als beim MT.

Als Richtwert für die reine Verlegeleistung kann eine Spanne zwischen 25 und 150 m/h angesetzt werden. Diese Verlegeleistung wird stark vom Rohrdurchmesser und der Geologie beeinflusst. Grundsätzlich sinkt die Verlegeleistung (in Metern) pro Zeiteinheit mit steigendem Rohrdurchmesser.

2.3.4 Wirtschaftliche Aspekte

Wie bereits in Abschnitt 2.2.4 erläutert, ist die Kostenfindung für MT- oder HDD-Bauwerke von vielen Faktoren abhängig. Daher ist das Aufstellen einer generellen Berechnungsformel nicht möglich. Insbesondere die Baugrundbedingungen im Trassenbereich haben einen überproportionalen Einfluss auf die spezifischen Verlegekosten.

Aus Erfahrung lässt sich jedoch generell abschätzen, dass eine Verlegung im HDD-Verfahren wirtschaftlicher ist als im Microtunneling, wenn der Baugrund diese Verfahrensweise mit vertretbarem technischen Risiko zulässt (also insbesondere in tonig-sandigen Böden).

2.3.5 Verfahrensbewertung

Eine Analyse der untersuchten Parameter führt zu folgender Verfahrensbewertung in Form von positiven und negativen Aspekten.

Positive Aspekte:

- Relativ geringer Aufwand für die Baustelleneinrichtung und -räumung (Bohrungsvorbereitung).
- Optimaler Einsatz des Rohrwerkstoffes Stahl.
- Sehr große Verlegelängen möglich (> 1.500 m).
- Schnelle Durchführung der Pilotbohrung.

Negative Aspekte:

- Relativ geringe Verlegegenauigkeit (zumindest im Vergleich mit MT).
- Große Einschränkungen hinsichtlich des Baugrunds notwendig.
- Begrenzung der Rohrdurchmesser (je kleiner die Rohre, desto besser ist HDD für die Verlegung geeignet).
- Schwierige Kontrolle und Handhabung des großen Bohrspülungsvolumens.
- Relativ hohe Anforderungen an die Qualität der Bohrspülung.

3 Zielvorgaben für neue Verfahren zur grabenlosen Rohrverlegung

3.1 Hintergrund

In der Vergangenheit sind wiederholt schwere Bauschäden im Zusammenhang mit der Durchführung von HDD-Projekten in schwierigem Baugrund aufgetreten. Hierbei hat sich insbesondere kiesiger, steiniger Boden als problematisch erwiesen (Abb. 3-1).

Die beobachteten Bauschäden reichen dabei von beschädigten Rohrumhüllungen über Stabilitätsprobleme des Bohrlochs beim Aufweiten (Abb. 3-2) bis hin zu einem Festwerden der Rohrleitung (Abb. 3-3 und 3-4) während des Einziehvorgangs bzw. massiven Beschädigungen der eingezogenen Rohrleitung (Abb. 3-5).



Abb. 3-1: Räumvorgang eines gescheiterten HDD-Projektes in steinig-kiesigem Baugrund.

Insbesondere bei einer Totalaufgabe stellt sich für Planer und Bauherren unmittelbar die Frage nach einer geeigneten Alternativtechnik, um das Bauziel doch noch erreichen zu können. Häufig wird in diesem Zusammenhang das Microtunneling oder die konventionelle, offene Bauweise (meistens in einer anderen Trasse) diskutiert.



Abb. 3-2: Tagbruch während eines Räumvorgangs mit einem 52 Zoll Räumer ($\varnothing = 1,32$ m).



Abb. 3-3: Bergeversuch einer festgezogenen 36 Zoll Rohrleitung ($\varnothing = 914$ mm).



Abb. 3-4: Bergeversuch einer festgezogenen 44 Zoll Rohrleitung ($\varnothing = 1.118 \text{ mm}$).



Abb. 3-5: Beschädigung einer mittels HDD verlegten 44 Zoll Stahlleitung aus hochfestem Stahl mit 17,2 mm Wandstärke.

Während die offene Bauweise oftmals aufgrund der Auswirkungen auf die Umwelt sowie in der Regel wegen erforderlicher Umtrassierungsarbeiten (Zeitverzögerungen durch aufwendige Genehmigungsverfahren) ausscheidet, mangelt es dem MT-Verfahren häufig, besonders bei kleinen Rohrdurchmessern, an der erforderlichen Reichweite. Zudem treten deutlich höhere Verlegekosten auf (auch bei großen Rohrleitungsdurchmessern) als in der ursprünglichen HDD-Variante budgetiert. In diesem Zusammenhang ist besonders auf die erforderlichen Schutzrohre hinzuweisen, die für sich genommen schon erhebliche Kosten verursachen [3-1, 3-2].

Für ein neues Verfahren zur grabenlosen Verlegung von Rohrleitungen unter Hindernissen ist deshalb anzustreben, die jeweiligen Vorteile der beiden etablierten Bautechniken HDD und MT zu kombinieren, ohne deren spezifische Nachteile zu übernehmen. Hierbei ist zu beachten, dass die projektspezifischen Rahmenbedingungen wie Baugrund, Bohrungslänge etc. sehr unterschiedlich sein können. Um eine neue Verlegemethode entwickeln zu können, bedarf es deshalb zunächst einmal einer klaren Zielvorgabe hinsichtlich des angestrebten Leistungsvermögens sowie der wirtschaftlichen Rahmenbedingungen.

Vor dem generellen Hintergrund, dass diese neue Technik insbesondere für den Einsatz in der Energie- und Rohstoffversorgung (z.B. Ferngasleitungen) eingesetzt werden soll, werden die anzustrebenden Zielvorgaben anhand der folgenden Aspekte entwickelt:

- Technische Aspekte
 - Geometrische Leistungsrenzen
 - Aspekte des Baugrunds
 - Einsetzbare Rohrmaterialien
- Wirtschaftliche Aspekte

3.2 Technische Aspekte

3.2.1 Geometrische Leistungsgrenzen

Beim Bau großer Erdgas- oder Erdölleitungen wird gegenwärtig häufig die Horizontalbohrtechnik zur Überwindung von künstlichen und natürlichen Hindernissen eingesetzt, während das Microtunneling in diesem Bereich wesentlich seltener zum Einsatz kommt. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, die

anzustrebenden geometrischen Leistungsgrenzen anhand konkreter Projekte zu ermitteln. Hierzu wurden von einer der ältesten und erfahrensten HDD-Bohrfirma (*HDI International s.a.s.*, Paris) die in der Vergangenheit mittels Horizontalbohrtechnik verlegten Rohrleitungen im Durchmesserbereich von 800 mm (32 Zoll) bis 1.200 mm (48 Zoll) analysiert [3-5].

Hierbei handelt es sich um 79 weltweit ausgeführte Projekte mit insgesamt mehr als 48.000 Metern verlegter Rohrleitung. Die kürzeste der berücksichtigten Bohrungen ist 259 m lang, die längste 1.200 m (Abb. 3-6, oben). Die mittlere Verlegelänge (alle Durchmesser) beträgt 609 m, wobei diese mittlere Verlegelänge in Abhängigkeit des Rohrdurchmessers zwischen ca. 445 m (44 Zoll) und ca. 792 m (48 Zoll) schwankt (Abb. 3-6, unten).

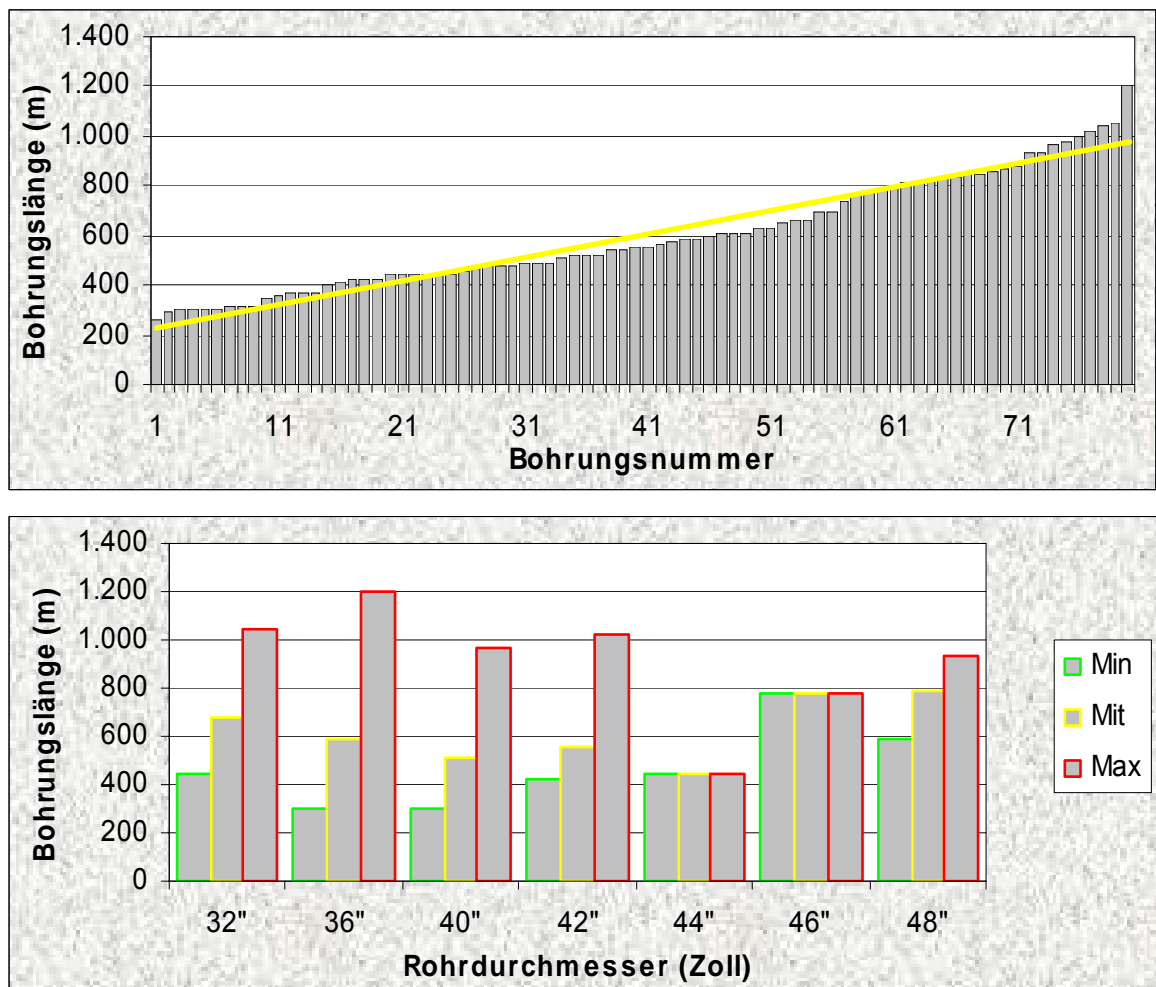


Abb. 3-6: Oben: Bohrungslängen von 79 untersuchten Referenzbohrungen im HDD-Verfahren (gelb = lineare Trendlinie)
Unten: Minimale, mittlere und maximale Verlegelängen der Referenzbohrungen in Abhängigkeit des Rohrdurchmessers.

Es erscheint somit sinnvoll, als Zielvorgabe des geometrischen Leistungsvermögens (Längen-Durchmesser-Werte) den Längenbereich von 200 bis 1.000 m und den Durchmesserbereich von 800 bis 1.200 mm vorzusehen. Dieser Bereich wird bisher im Wesentlichen sowohl vom HDD- als auch vom MT-Verfahren abgedeckt (Abb. 3-7).

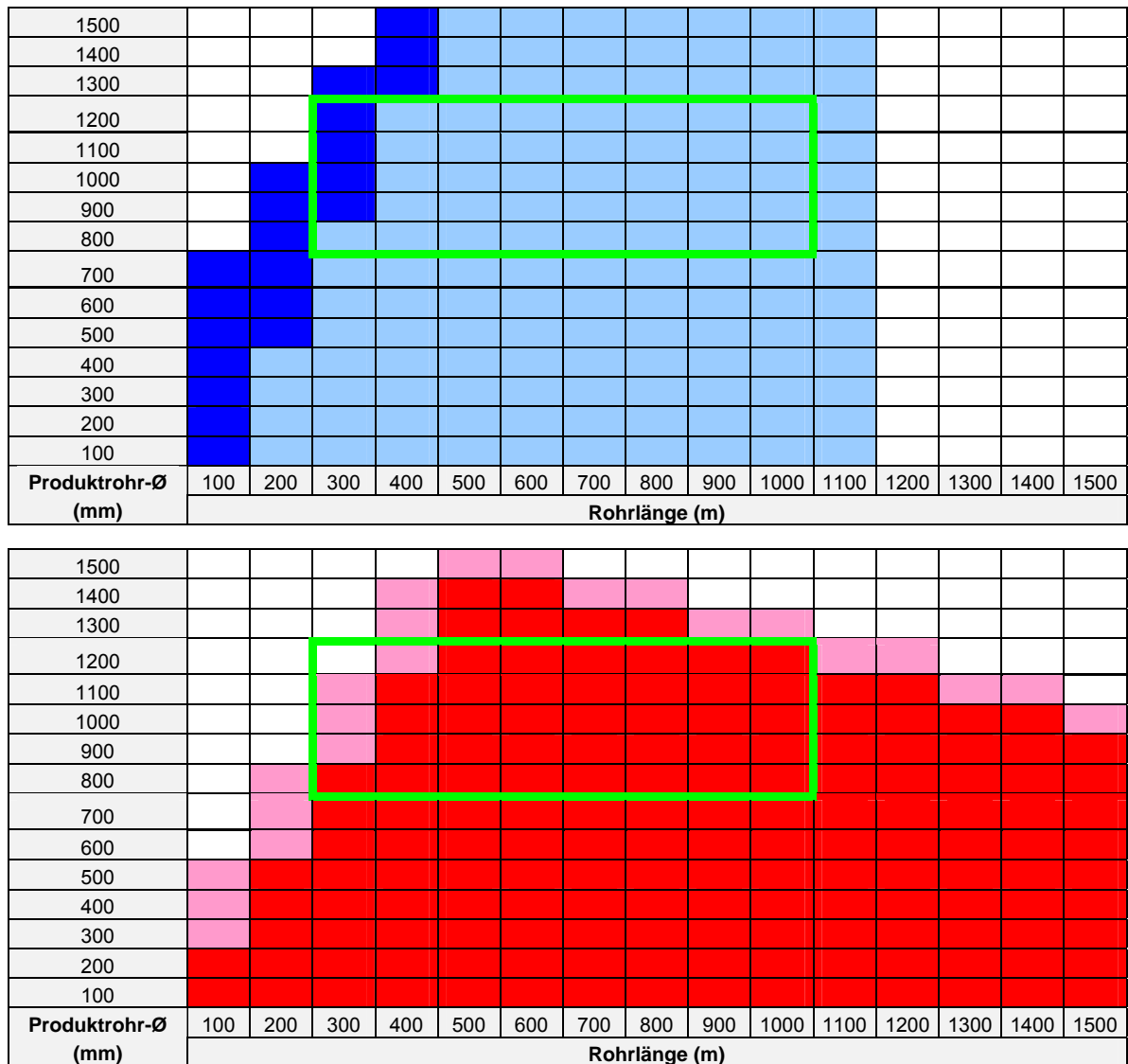


Abb. 3-7: Darstellung des Zielbereichs der geometrischen Leistungsfähigkeit für das neu zu entwickelnde Verfahren (grün umrandet) vor dem Hintergrund der entsprechenden Bereiche des MT (oben) bzw. des HDD (unten).

3.2.2 Aspekte des Baugrunds

Eine weitere zentrale Forderung bei der Entwicklung eines neuen Verlegeverfahrens sollte die Eignung für solche geologischen Bedingungen sein, bei denen die (gegenüber dem MT meistens wirtschaftlichere) HDD-Technik bisher nur stark eingeschränkt eingesetzt werden konnte.

Dieses sind in erster Linie kiesige Böden sowie kiesig-sandige Schichten, in die einzelne Steinhindernisse oder Gerölle eingelagert sein können. Zur genaueren Definition bietet sich hier [3-3] an (*ATV DIN 18319: Einbau von vorgefertigten Rohren beliebigen Profils durch Pressen, Rammen oder Ziehen*).

Dort werden die Lockergesteine zunächst in bindige und nicht-bindige Grundarten unterschieden. Da alle grabenlosen Rohrverlegetechniken sehr empfindlich auf große Steine im Boden reagieren (> 63 mm Kantenlänge), wurde eine Zusatzklassifizierung eingeführt, in der beschrieben wird, welche Steingrößen > 63 mm in welchen prozentualen Mengen im Boden angetroffen werden können [3-4]. Die Zusatzklasse S1 beschreibt z.B. Steingrößen bis 300 mm Durchmesser mit einem Masseanteil im Boden von maximal 30%, während die Zusatzklasse S3 für Steingrößen bis 600 mm Durchmesser mit einem Masseanteil im Boden von maximal 30% steht (Abb. 3-8).



Abb. 3-8: Bindiger Baugrund (Mecklenburg-Vorpommern) mit Einlagerung größerer Einzelsteine (Steinklassen S1 und S3 sowie Blöcke).

Als baugrundspezifische Zielvorgabe für ein neu zu entwickelndes Verfahren werden Bodenarten gewählt, die in der Vergangenheit häufiger zu den oben beschriebenen Problemen bei der Durchführung von HDD-Projekten geführt haben. In DIN 18319 werden diese Bodenarten als L - S1 bezeichnet (Lockergesteine mit der Zusatzklassen S1).

Neben [3-3] existieren weitere, häufig verwendete Normen zur Beschreibung des Baugrunds, so z.B. die DIN 4022 (*Benennung und Beschreibung von Boden und Fels*). In dieser Norm werden Korngrößenbereiche definiert, anhand derer Bodenschichten unterschieden werden können (Abb. 3-9).

Bereich/Benennung		Kurzzeichen	Korngrößenbereich mm
Grobkornbereich (Siebkorn)	Blöcke	Y	über 200
	Steine	X	über 63 bis 200
	Kieskorn Grobkies Mittelkies Feinkies	G gG mG fG	über 2 bis 63 über 20 bis 63 über 6,3 bis 20 über 2,0 bis 6,3
	Sandkorn Grobsand Mittelsand Feinsand	S gS mS fS	über 0,06 bis 2,0 über 0,6 bis 2,0 über 0,2 bis 0,6 über 0,06 bis 0,2
Feinkornbereich (Schlammkorn)	Schluffkorn Grobschluff Mittelschluff Feinschluff	U gU mU fU	über 0,002 bis 0,06 über 0,02 bis 0,06 über 0,006 bis 0,02 über 0,002 bis 0,006
	Tonkorn (Feinstes)	T	unter 0,002

Abb. 3-9: Korngrößenbereiche nach DIN 4022 [3-6].

Eine genaue Entsprechung zu DIN 18319 gibt es in DIN 4022 nicht, die Zusatzklasse X ist mit der oben beschriebenen Zusatzklasse S1 vergleichbar. Der jeweilige Schichtaufbau wird dann oftmals in so genannten Körnungslinien dargestellt [3-7], die aus Bodenproben im Labor gewonnen werden (Abb. 3-10).

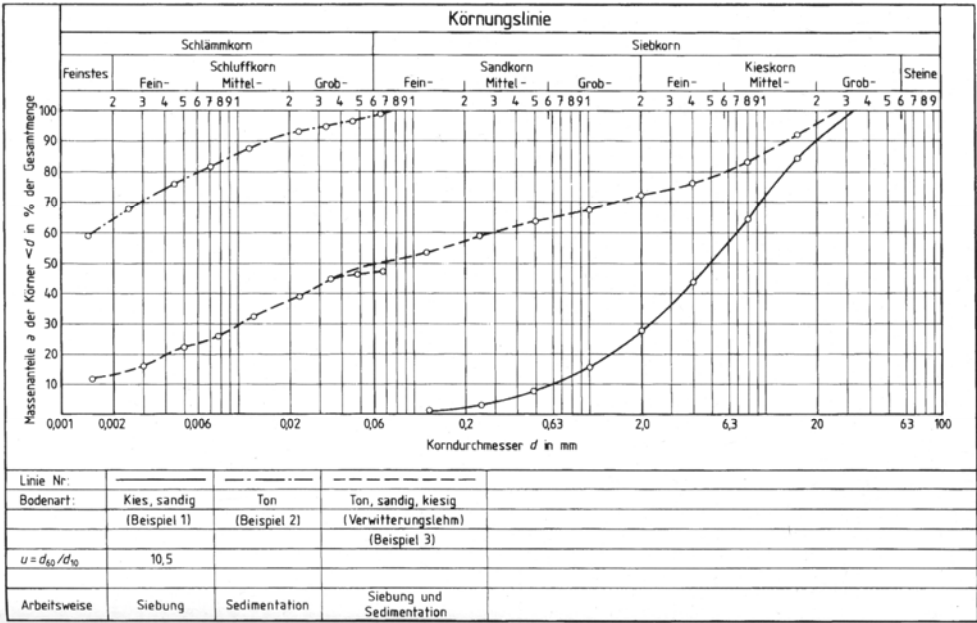


Abb. 3-10: Beispielhafte Körnungslinien nach DIN 18123 [3-7].

In der DIN 18300 (*Erdarbeiten*) werden im Wesentlichen sieben Boden- und Felsklassen unterschieden [3-8]. Der relevante Bodenaufbau wird am besten durch die Klasse 3 (leicht lösbare Bodenarten) beschrieben (die Bezeichnung leicht lösbar sollte an dieser Stelle nicht missverstanden werden, sie gilt für Erdarbeiten und ausdrücklich nicht für Bohrarbeiten).

Nichtbindige bis schwachbindige Sande, Kiese und Sand-Kies-Gemische mit bis zu 15% Beimengungen an Schluff und Ton (Korngröße kleiner als 0,06 mm) und mit höchstens 30% Steinen von über 63 mm Korngröße bis zu 0,01 m³ Rauminhalt (= Kugel mit ca. 0,30 m Durchmesser).

Von allen aufgeführten Bodenbeschreibungen kommt die letztgenannte nach DIN 18300 der angestrebten Geologie am nächsten und soll deshalb im Weiteren als baugrundspezifische Zielvorgabe verwendet werden.

3.2.3 Einsetzbare Rohrmaterialien

Das hier zu entwickelnde neue Verlegeverfahren zielt in erster Linie auf den Energie- und Rohstoffsektor, d.h. auf die grabenlose Verlegung von Öl- und Gasleitungen. Diese Energieträger werden im hier betrachteten Durchmesserbereich (s.o.) generell in Stahlleitungen transportiert.

Demzufolge wird als Rohrmaterial für die weitere Bearbeitung ausschließlich Stahl in Betracht gezogen.

3.3 Wirtschaftliche Aspekte

Eine Abschätzung bzw. Vorgaben zu den akzeptablen Baukosten können nur sehr schwierig durchgeführt bzw. aufgestellt werden. Grundsätzlich sollten die spezifischen Verlegekosten in etwa vergleichbar sein mit den konkurrierenden Verfahren HDD und MT.

Dabei kann angenommen werden, dass das HDD-Verfahren (falls aus risikotechnischer Betrachtung einsetzbar) in der Regel die wirtschaftlichere Bauweise als das MT-Verfahren darstellt.

Daher sollte für das neu zu entwickelnde Verfahren angestrebt werden, zumindest wirtschaftlicher zu sein als das MT-Verfahren, um in den oben beschriebenen Baugrundbedingungen eine risikoärmere Alternative als das (wirtschaftlich) günstigere HDD-Verfahren darzustellen.

Sollten die Kosten für das neue Verlegeverfahren sogar mit denjenigen des HDD vergleichbar sein, wäre es denkbar, den Einsatzbereich auch auf einfachere Böden auszudehnen. Diese Möglichkeit bleibt jedoch zukünftigen Entwicklungen vorbehalten und wird in dieser Arbeit nicht näher analysiert.

3.4 Zusammenfassung der Zielvorgaben

Die wesentlichen Zielvorgaben für das neue Verlegeverfahren können somit wie folgt formuliert werden:

- Verlegung von Stahlrohrleitungen im Durchmesserbereich von 800 mm bis 1.200 mm und für Verlegelängen zwischen 500 m und 1.000 m in nichtbindigen bis schwachbindigen Sanden, Kiesen und Sand-Kies-Gemischen mit bis zu 15% Beimengungen an Schluff und Ton (Korngröße kleiner als 0,06 mm) und mit höchstens 30% Steinen von über 63 mm Korngröße bis zu 0,01 m³ Rauminhalt, wobei das Baurisiko in diesen Bodenschichten niedriger als beim HDD-Verfahren und die Baukosten wiederum niedriger als beim MT-Verfahren sein sollen.

Die wesentlichen Aussagen dieser Zielformulierung sind in Tab. 3-1 noch einmal zusammengefasst. Zusätzlich wird angedeutet, welches der konkurrierenden Verfahren (MT und HDD) diese Zielvorgaben erfüllt bzw. nicht erfüllt.

Tab. 3-1: Wesentliche Zielvorgaben für ein neues Verlegeverfahren sowie Angaben dazu, inwiefern HDD und MT diese Vorgaben abdecken können.

Kriterium	MT	HDD	Neu
Rohrdimensionen: D = 800 - 1200 mm, L = 500 - 1.000 m	Werkzeugwechsel erforderlich		
Aspekte des Baugrunds: Sandiger Kies mit Steinen (bis 300 mm)		Kies u. Steine problematisch	
Geeignetes Rohrmaterial: Stahl	Betonschutzrohre erforderlich		
Wirtschaftliche Aspekte: Spezifische Verlegekosten	Generell eher hohe Kosten	Generell eher niedrige Kosten	Wenn möglich < MT-Kosten

= gut geeignet , zutreffend

= bedingt geeignet, bedingt zutreffend

= nicht geeignet, nicht zutreffend

4 „Push & Pull - Technology“ (PPT)

4.1 Verfahrensbeschreibung

Das PPT-Verfahren wurde als 2-Schritt-Verfahren ausgelegt, bestehend aus den beiden Arbeitsschritten

- Pilotbohrung und
- Aufweitbohrung mit Einziehvorgang.

Im ersten Arbeitsschritt wird eine gesteuerte Pilotbohrung durchgeführt, während im zweiten Schritt das Bohrloch aufgeweitet und gleichzeitig die zu verlegende Rohrleitung eingezogen wird.

4.1.1 Pilotbohrung

Die Pilotbohrung des PPT-Verfahrens entspricht vollständig derjenigen einer konventionellen Horizontalbohrung im HDD-Verfahren. Von einem übertägig aufgestellten Horizontalbohrgerät wird entlang einer vorgegebenen Trasse eine in der Regel bananenförmige Pilotbohrung von einem Eintrittspunkt an der Rigsite zu einem Austrittspunkt an der Pipesite durchgeführt (Abb. 4-1).

Tendenziell können diese Pilotbohrungen in kritischen Bereichen mit geringeren Überdeckungen hergestellt werden als bei der konventionellen HDD-Technik, da beim PPT-Einsatz verfahrensbedingt nicht mit Bohrlochinstabilitäten und damit Tagbrüchen zu rechnen ist [4-1, 4-2].

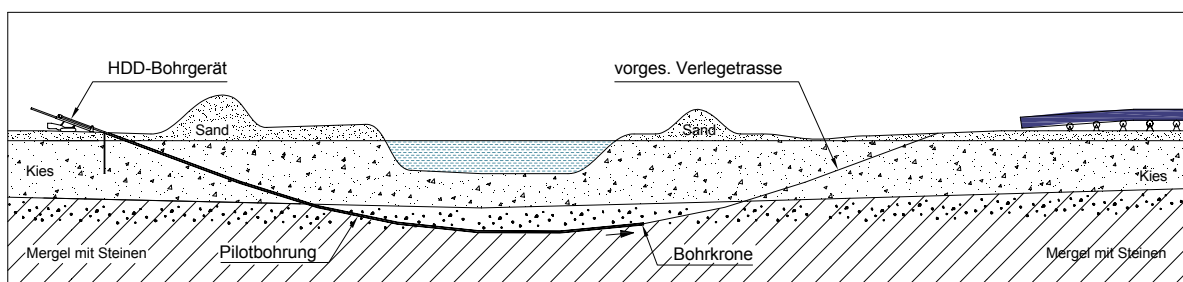


Abb. 4-1: Pilotbohrung beim PPT-Verfahren (Prinzip).

4.1.2 Aufweitbohrung und Einziehvorgang

Nachdem die Pilotbohrung am Zielpunkt angekommen ist, werden der Bohrmeißel sowie die nichtmagnetischen Bohrstangen abgebaut und der Bohrstrang direkt mit der PPT-Maschine verbunden. Hierbei handelt es sich im Wesentlichen um eine modifizierte Micro-Maschine mit Schneirad und nachgeschaltetem Brecher. Der

einziehende Rohrstrang wird mittels Schweißung mit der PPT-Maschine verbunden.

Anmerkung:

Für den Bohrkopf des PPT-Verfahrens werden in dieser Arbeit auch die Begriffe „PPT-Maschine“ oder „Vortriebsmaschine“ verwendet, da sich diese Ausdrücke während der Entwicklung und der Feldversuche etabliert haben und der Bohrkopf grundsätzlich auch die Definition einer Maschine erfüllt (danach sind Maschinen „mechanische Vorrichtungen aus festen und beweglichen Teilen, bei denen die beweglichen Teile durch von außen zugeleitete Energie in vorgeschriebenen Bahnen und regelmäßiger Wiederkehr bewegt werden“).

Der für die Verlegung im PPT-Verfahren vorgesehene Rohrstrang wird wie beim HDD über einen Oberbogen im elastischen Radius auf Rollenböcken abgelegt.

Zum Aufweiten des Bohrlochs und zum gleichzeitigen Einziehen der Rohrleitung wird vom Bohrgerät auf der Rigsite über den Bohrstrang das Schneidrad der PPT-Maschine in Rotation versetzt und die Düsen in der PPT-Maschine werden durch den Bohrstrang mit einer ausreichenden Menge an Bohrspülung versorgt. Gleichzeitig wird die PPT-Maschine und damit der fest verbundene Rohrstrang von der Bohranlage durch das Bohrloch gezogen. Dabei kann das Schneidrad, je nach Geologie und Auslegung, Steine und Blöcke bis ca. 1/3 Schneidrad-durchmesser bewältigen. Die grobkörnigen Bestandteile werden im nachgeschalteten Brecher weiter zerkleinert und durch eine Förderleitung im Rohrstrang zur Pipesite transportiert (Abb. 4-2).

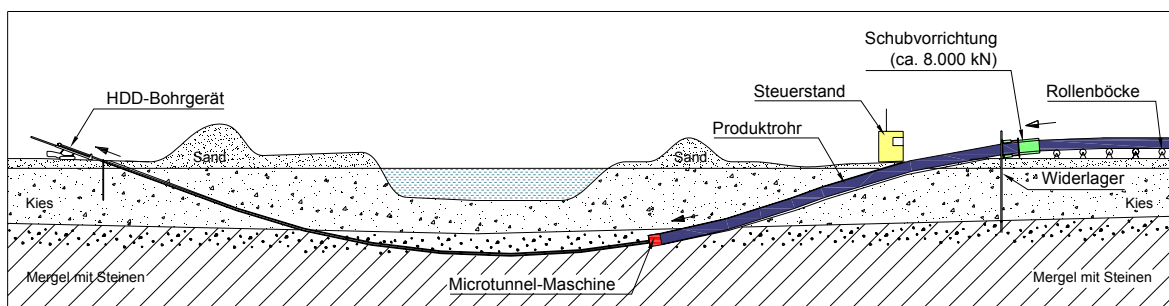


Abb. 4-2: Aufweiten und Einziehen (Prinzip).

Aufgrund des relativ kleinen Überschnitts (Überschnitt = Verhältnis Bohrloch-durchmesser zu Rohrdurchmesser) zwischen Schneidradaußendurchmesser und Produktrohr Außendurchmesser (ca. 100 mm bei 1.000 mm Rohrdurchmesser) ist mit relativ hohen Einziehkräften zu rechnen, insbesondere in nicht bindigen Böden (z.B. Kiesen). Aus diesem Grund wird die Zugkraft der HDD-Anlage im

Wesentlichen zum Aufbringen der erforderlichen Bohrkraft (Schneidradandruck) sowie zur Überwindung der Mantelreibung an der PPT-Maschine benötigt. Die am Rohrstrang entstehende Reibung wird von der Push-Unit (weitere Bezeichnungen: Pipe Thruster bzw. Thruster) auf der Pipesite aufgebracht.

Hierbei handelt es sich um eine hydraulische Vorschubeinrichtung, die über kraftschlüssige Klemmen von außen auf den Rohrstrang greift. Diese Klemmen werden von Hydraulikzylindern mit steuerbarer Geschwindigkeit in Einziehrichtung vorgeschoben. Durch Kombination zweier solcher Thruster ist ein nahezu ruckfreier Vorschub möglich, da jeweils nur ein Vorschubelement in Arbeit ist, während das zweite in seine Ausgangsposition zurückfährt und den weiteren Vorschub übernimmt, sobald die Hydraulikzylinder der ersten Einheit ihren maximalen Vorschubweg erreicht haben.

Nachdem die PPT-Maschine an der Rigsite die Eintrittsgrube erreicht hat, wird sie vom Rohrstrang entkoppelt. Im Anschluss kann das Leitungsstück in die angrenzenden Leitungsabschnitte eingebunden werden [4-1, 4-2].

4.2 Systemkomponenten

4.2.1 Maschinentechnik

Als wesentliche, maschinentechnische Komponenten des PPT-Verfahrens sind zu nennen:

- Horizontalbohrgerät,
- Rohrstrang,
- Vermessungssystem,
- Hochdruckpumpe,
- Aufbereitungsanlage,
- Vortriebsmaschine,
- Produktrohr und
- Pipe Thruster.

Die genannten Komponenten werden nachfolgend kurz beschrieben und in ihrer jeweiligen Funktion erläutert.

Horizontalbohrgerät

Die Bohrgerätedimensionierung und -auslegung für das PPT-Verfahren richtet sich im Wesentlichen nach den beiden mechanischen Größen

- Zugkraft und
- Drehmoment.

Für beide Größen wird nachfolgend eine Abschätzung der zu erwartenden Anforderungen durchgeführt.

Zugkraft

Die während des Einziehvorgangs erforderliche Zugkraft setzt sich aus den folgenden drei Einzelkomponenten zusammen:

- Reibung zwischen Rohroberfläche und Bohrspülung (F_1),
- Reibung zwischen Rohroberfläche und Bohrlochwand (F_2) sowie
- erforderliche Andruckkraft für das Schneidrad (F_3).

Für die weitere Betrachtung werden ausschließlich die aus dem Eigengewicht bzw. dem Auftrieb resultierenden Normalkräfte berücksichtigt. Weitere relevante Kraftkomponenten, die sich z.B. aus der in gekrümmten Bohrlochabschnitten entstehenden Rückstellkraft des elastischen Produktrohrs ergeben können, sind nur bei konkreten Bohrlinien und Rohrparametern zu berechnen und deshalb für eine generelle Betrachtung ungeeignet. Aufgrund der angestrebten großen Bohrungsradien erscheint es vertretbar, diese in einer ersten Näherung zu vernachlässigen.

Reibung Rohroberfläche / Bohrspülung (F_1):

Für die geplanten Rohrdurchmesser (800 bis 1.200 mm) und Rohrlängen (500 bis 1.000 m) ergibt sich eine spezifische Rohroberfläche im Bohrloch von ca. 1.250 bis 3.750 m². Die Reibungswerte an der Rohroberfläche während des Rohreinzugs werden in der Literatur zwischen 0,05 und 0,35 kN/m² angegeben (arithmetischer Mittelwert = 0,2 kN/m²), wobei hier die reine Flüssigkeitsreibung, d.h. Bohrspülung und Rohroberfläche, betrachtet wird [4-3, 4-4, 4-5, 4-6]. Es erscheint sinnvoll, den niedrigeren Wert bei einer unbelasteten Bentonit-Wasser-Bohrspülung und den höheren Wert bei einer stark mit Bohrklein aufgeladener Bohrspülung zu verwenden.

Beim MT-Verfahren tritt keine Reibung zwischen der Rohroberfläche und der Bohrspülung auf, da davon ausgegangen werden muss, dass der relativ kleine Ringraum bei diesem Verlegeverfahren grundsätzlich auch mit Bohrklein versetzt ist und nur teilweise durch spezielle Schmiersysteme mit Bentonitsuspension beaufschlagt wird. Für diese spezifische Reibung werden in der Literatur sehr große Spannen zwischen 0,5 kN/m² und 22,5 kN/m² angegeben [4-7]. Interessanterweise beziehen sich sowohl der Minimal- als auch der Maximalwert auf tonige Böden, während die entsprechenden Werte für kiesigen Baugrund zwischen 0,8 kN/m² und 17,3 kN/m² liegen (empirischer Mittelwert = 5,4 kN/m² nach [4-7]).

Da für das PPT-Verfahren ein größerer Überschnitt als beim MT-Verfahren, aber ein kleinerer Überschnitt als beim HDD-Verfahren vorgesehen ist, wird für die weitere Dimensionierung angenommen, dass sich der diesbezügliche, spezifische Reibungswert zwischen den oben genannten Werten bewegen wird und demzufolge auf 2,5 kN/m² festgelegt werden kann (wobei auch hier eine starke Abhängigkeit von den jeweiligen Bodenparametern gegeben ist).

Mit Formel F-4/1 berechnet sich die Kraftkomponente aus der Reibung zwischen Rohroberfläche und Bohrspülung für den hier untersuchten Rohrdurchmesser-Bohrungs-Längenbereich zu:

F-4/1	F_1	=	$A_{\text{spez}} * L * \mu_1$	[kN]
--------------	-------	---	-------------------------------	------

mit:

F_1	=	Reibungskraft zw. Rohroberfläche und Bohrspülung	[kN]
A_{spez}	=	spezifische Rohroberfläche	[m ² /m]
L	=	Bohrungslänge	[m]
μ_1	=	Reibungsbeiwert (hier: 2,5)	[kN/m ²]

Mit den getroffenen Annahmen berechnen sich die zu erwartenden Zugkraftanteile aus der Oberflächenreibung (Rohr/Spülung) zu ca. 3.150 bis 9.425 kN.

Reibung zwischen Rohroberfläche und Bohrlochwand (F_2):

Jede in ein mit Bohrflüssigkeit gefülltes Bohrloch eingezogene (abgedichtete) Rohrleitung erfährt einen bestimmten Auftrieb. Dieser ist vom spezifischen

Rohrvolumen, dem spezifischen Rohrgewicht sowie dem spezifischen Gewicht der Bohrspülung abhängig.

Aus Erfahrungswerten beim HDD liegt die Dichte der Bohrspülung beim Rohreinzug etwa zwischen 1,1 und 1,2 t/m³. Die Rohrgewichte werden direkt durch den Rohrdurchmesser und die jeweilige Wandstärke (d.h. die spezifische Menge Stahl pro Längeneinheit) bestimmt. Zusätzlich können weitere Einbauten im Produktrohr (Lenzpumpen, Kabel etc.) oder besondere Ballastierungskörper (z.B. wassergefüllte HDPE-Rohre kleineren Durchmessers) zum Einsatz gelangen. Dabei kann ein Gewicht zwischen ca. 150 und mehr als 500 kg/m auftreten.

Bei großen HDD-Projekten wird stets versucht, den resultierenden Auftrieb möglichst gering einzustellen. Die Rohrleitung sollte möglichst im Bohrloch schweben und nicht mit der Rohrsohle (bei Abtrieb) bzw. mit der Rohrfirste (bei Auftrieb) in Kontakt treten und damit Reibung erzeugen. Zugkraftkomponenten, die aus der Biegung der Rohrleitung im Bohrloch und dem daraus resultierenden Anpressdruck an die Bohrlochwand entstehen, werden für diese Abschätzung vernachlässigt.

Hinsichtlich der Reibungsbeiwerte finden sich in der Literatur Werte zwischen 0,1 und 1,0 (= theoretischer Wert), wobei die Erfahrung gezeigt hat, dass ein Reibungsbeiwert von ca. 0,3 für sehr viele Bodenarten zutreffend ist [4-3, 4-4, 4-7].

Für die weitere Betrachtung wird angenommen, dass die resultierende Auftriebskraft auf etwa 1,5 kN/m eingestellt werden kann. Damit berechnet sich die Kraftkomponente aus der Reibung zwischen Rohroberfläche und Bohrlochwand für den hier untersuchten Rohrdurchmesser-Bohrungs-Längenbereich gemäß Formel F-4/2 zu:

F-4/2	F_2	=	$N_{\text{spez}} * L * \mu_2$	[kN]
--------------	-------	---	-------------------------------	------

mit:

F_2	=	Reibungskraft zw. Rohroberfläche und Bohrlochwand	[kN]
N_{spez}	=	spezifische Normalkraft des Rohres (hier: 1,5 kN/m)	[kN/m]
L	=	Bohrungslänge	[m]
μ_2	=	Reibungsbeiwert (hier: 0,3)	[-]

Mit den getroffenen Annahmen berechnen sich die zu erwartenden Zugkraftanteile aus der Bodenreibung (Rohr/Bohrloch) zu ca. 225 - 450 kN.

Erforderliche Anpresskraft für das Schneidrad (F_3):

Als letzte Komponente bei der Zugkraftermittlung ist die zum Lösen des Bodens erforderliche Anpresskraft des Schneidrads an die Ortsbrust zu berücksichtigen. Hier können die entsprechenden Erfahrungswerte und Berechnungsformeln aus dem Microtunneling herangezogen werden, da der Lösevorgang große Ähnlichkeit aufweist [4-8].

Bei den hier untersuchten Bohrlochdurchmessern von ca. 1,0 bis 1,5 m und einem erfahrungsgemäßen, spezifischen Anpressdruck von ca. 300 kN pro Quadratmeter Schneidradfläche, ist nach Formel F-4/3 mit einer erforderlichen Zugkraft von ca. 200 bis 500 kN zu rechnen. Das bereits während der Pilotbohrung geschnittene Zentrum wurde bei dieser Abschätzung kraftmindernd berücksichtigt.

F-4/3	F_3	=	$S_{\text{spez}} \cdot \mu_3$	[kN]
	mit:			
	F_3	=	Andruckkraft am Schneidrad	[kN]
	S_{spez}	=	spezifische Schneidradfläche	[m ²]
	μ_3	=	spezifischer Anpressdruck (hier: 300)	[kN/m ²]

In der Summe ergeben sich für die untersuchten Rohr- und Bohrlochdimensionen erforderliche Gesamtzugkräfte zwischen ca. 3.500 und 10.500 kN (gerundete Werte).

Verfahrensbedingt soll nicht die gesamte erforderliche Zugkraft vom Bohrgerät aufgebracht werden. Dieses wäre zwar maschinentechnisch möglich, jedoch könnte kein handelsüblicher Bohrstrang derart hohe Axialkräfte übertragen.

Aus diesem Grund wurde der Pipe Thruster entwickelt (s.u.), der nach heutiger Abschätzung bis zu ca. 5.000 kN Axialkräfte aufbringen kann und diese direkt in das Produktrohr und nicht in den Bohrstrang einleitet. Damit läge der maximale Zugkraftanteil des Bohrgerätes bei etwa 5.500 kN und damit noch immer über der, für handelsübliche Bohrgestänge realisierbaren Kraft.

Aus den genannten Gründen wird eine Bohrgerätegröße mit einer maximalen Zugkraft von 4.000 kN ausgewählt. Daher muss gleichzeitig eine Verkürzung der maximal möglichen Verlegelängen vorgenommen werden. Weitere Einkürzungen ergeben sich aus konstruktiven Gründen beim Pipe Thruster, da bei kleineren Rohrdurchmessern in der momentanen Konfiguration nur Werte zwischen ca. 3.350 kN (DN800) und 5.000 kN (DN1200) übertragen werden können (siehe hierzu Abschnitt Pipe Thruster).

Drehmoment

Das erforderliche Drehmoment während der Aufweitbohrung bzw. während des Einziehvorgangs setzt sich im Wesentlichen aus folgenden drei Einzelkomponenten zusammen:

- Reibung zw. Bohrgestängeoberfläche und Bohrspülung (M_1),
- Reibung zw. Bohrgestängeoberfläche und Bohrlochwand (M_2) und
- erforderliches Drehmoment für das Schneidrad (M_3).

Reibung zwischen Bohrgestängeoberfläche und Bohrspülung (M_1)

Die Gestängeoberfläche für ein handelsübliches 6.5/8“ Bohrgestänge kann mit ca. 0,55 m² pro Meter Bohrstangenlänge angesetzt werden (Tool Joint-Anteil durch Aufrundung berücksichtigt). Unter Ansatz eines für den normalen HDD-Prozess üblichen Reibungswertes ergibt sich damit eine spezifische Reibungskraft von ca. 0,16 kN pro m² Oberfläche. Bei einem Hebelarm von ca. 0,084 m resultiert daraus ein spezifisches Drehmoment von ca. 0,014 kNm pro Meter Bohrstrang (Formel F-4/4).

F-4/4	M_1	=	$A_{\text{spez}} * r_1 * L * \mu_1$	[kNm]
--------------	-------	---	-------------------------------------	-------

mit:

M_1	=	Reibmoment zw. Bohrgestängeoberfläche u. Bohrspülung	[kNm]
A_{spez}	=	spezifische Bohrgestängeoberfläche (hier: 0,55)	[m ² /m]
r_1	=	Hebelarm (hier: 0,084)	[m]
L	=	Bohrungslänge	[m]
μ_1	=	Reibungsbeiwert (hier: 0,3)	[kN/m ²]

Damit ergeben sich an dieser Stelle Reibmomente zwischen ca. 7 kNm für eine 500 m lange Bohrung und 14 kNm für eine 1.000 m lange Bohrung [4-9].

Reibung zwischen Bohrgestängeoberfläche und Bohrlochwand (M_2)

Das spezifische Bohrstangengewicht der untersuchten Dimension beträgt ca. 40,4 kg/m (Pipe + Tool Joint). Hinzu kommt das Gewicht der Bohrspülung, das sich aus einem spezifischen Inhalt von ca. 17,7 l/m und bei einem Spülgewicht von ca. 1,1 kg/l zu einem zusätzlichen Gewicht von ca. 19,5 kg/m Bohrstrang ($\Sigma = 59,9$ kg/m) berechnet. Dem gegenüber steht der Auftrieb des Bohrstrangs, bei einer Verdrängung von ca. 23 l pro laufenden Meter und einem Spülgewicht im Ringraum von 1,2 kg/m (Cuttings), ergibt sich ein Auftrieb von ca. 27,6 kg/m. Das resultierende Gewicht beträgt damit 32,3 kg/m (Abtrieb). Bei einem Hebelarm von ca. 0,1 m (Tool Joints) resultiert daraus ein spezifisches Drehmoment von ca. 9,5 Nm pro Meter Bohrstrang (Formel F-4/5).

F-4/5	M_2	=	$N_{\text{spez}} * r_2 * L * \mu_2$	[kNm]
--------------	-------	---	-------------------------------------	-------

mit:

M_2	=	Reibmoment zw. Bohrgestängeoberfläche u. Bohrlochwand [kNm]
N_{spez}	=	spez. Normalkraft des Bohrgestänges (hier: 0,317 kN) [kN/m]
r_2	=	Hebelarm (hier: 0,1) [m]
L	=	Bohrungslänge [m]
μ_2	=	Reibungsbeiwert (hier: 0,3) [-]

Mit den getroffenen Annahmen ergeben sich Reibmomente zwischen etwa 4,75 und 9,5 kNm [4-10].

Erforderliches Drehmoment für das Schneidrad (M_3)

Für den Drehmomentbedarf am Schneidrad (einschließlich Brecher) können nur Abschätzungen durchgeführt werden, da geeignete Erfahrungswerte in dem betrachteten Durchmesserbereich nicht für MT-Bohrungen mit vorheriger Zentrumsbohrung (Pilotbohrung) vorliegen. Zudem ist das Lösemoment stark abhängig (und damit stark beeinflussbar) von der Bohrgeschwindigkeit.

Erwartet wird aus heutiger Sicht ein Drehmomentbedarf für diesen Bereich in Höhe von 50 bis 75 kNm. Insgesamt ergibt sich für die betrachteten Bohrungsdimensionen ein Drehmomentbedarf von ca. 60 bis 100 kNm (Abb. 4-3).

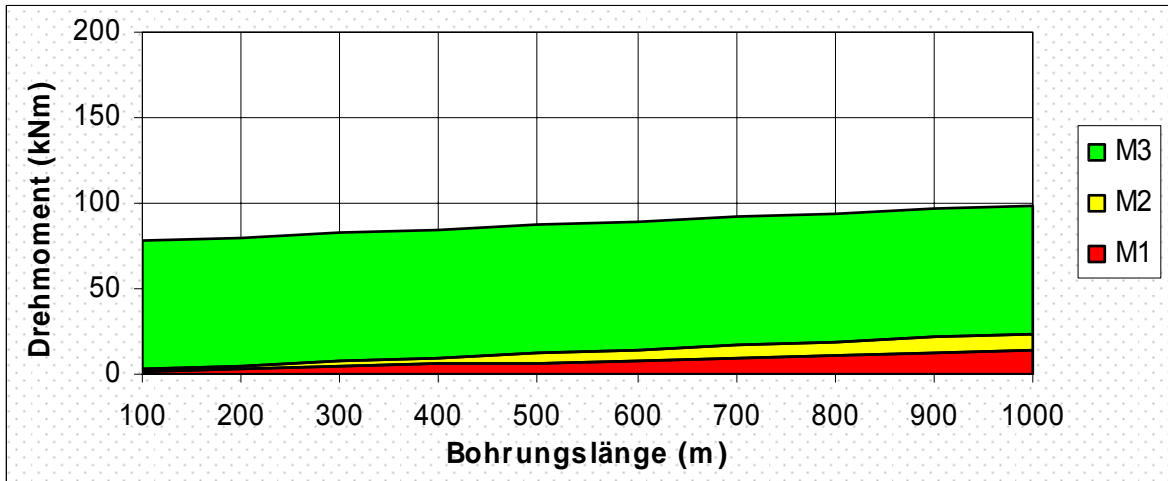


Abb. 4-3: Drehmomententwicklung beim PPT-Verfahren bei einem Schneidraddurchmesser von ca. 1,5 m.

Als Zwischenergebnis kann somit festgehalten werden, dass die für das PPT-Verfahren erforderlichen Zugkräfte und Drehmomente von den so genannten Mega-Rigs erfüllt werden, die bereits in geeigneter Dimensionierung von der Industrie angeboten werden (Abb. 4-4).



Abb. 4-4: Einsatz einer 4.000-kN Bohranlage (Mega-Rig) während eines konventionellen HDD-Projekts.

Bohrstrang

Für die Übertragung der geforderten, großen axialen Kräfte und Drehmomente ist ein besonders belastbares Bohrgestänge zwingend erforderlich. Dabei ist zu

beachten, dass während der Bohrungsdurchführung neben den diskutierten Belastungen, weitere Einwirkungen auf den Bohrstrang erfolgen, z.B. die aus der Bohrlochkrümmung resultierende Spannung im Rohrmaterial.

Des Weiteren tritt während der Bohrungsdurchführung, durch die permanente Rotation des Bohrstrangs in den nicht geraden Bohrlochabschnitten, eine kontinuierliche Wechselbelastung Zug/Druck im Rohrmaterial auf, die erfahrungsgemäß die Haltbarkeit des Materials stark negativ beeinflusst [4-11].

Zudem lassen die übertragbaren Kräfte und Momente, infolge starken Abriebs in kiesigen und steinigen Bodenschichten während der Projektdurchführungen kontinuierlich nach. Daher kann davon ausgegangen werden, dass die maximal erreichbare Verlegelänge nur im Idealfall die oben ermittelten Werte erreichen kann. In der Praxis wird der Zustand und damit die Festigkeit des eingesetzten Bohrstrangs ein stark limitierendes Element werden und bedarf in jedem konkreten Einsatzfall einer genauen Überprüfung und Berücksichtigung [4-13].

Von den handelsüblichen Bohrstangen nach API RP 7G weisen z.B. folgende Bohrgestänge eine hohe mechanische Festigkeiten auf [4-12]:

- 5 Zoll Bohrgestänge / 19,5 lbs/ft / Class N / Grade S-135 / NC50
 - Axiale Festigkeit = 3.168 kN (Drillpipe)
 - Torsionsfestigkeit = 86 kNm (Tool Joint)
- 5.1/2 Zoll Bohrgestänge / 24,70 lbs/ft / Class N / Grade S-135 / 5.1/2 Zoll IF
 - Axiale Festigkeit = 3.981 kN (Drillpipe)
 - Torsionsfestigkeit = 109 kNm (Tool Joint)
- 6.5/8 Zoll Bohrgestänge / 25,20 lbs/ft / Class N / Grade S-135 / 6.5/8 Zoll FH
 - Axiale Festigkeit = 4.274 kN (Drillpipe)
 - Torsionsfestigkeit = 133 kNm (Tool Joint)

Für das PPT-Verfahren weist nach heutigem Stand ein 6.5/8“-Gestänge (mit entsprechenden Verbindern) die höchsten mechanischen Belastbarkeiten aller gängigen API-Gestänge auf. Allerdings bedeutet für alle Bohrgestänge die Kombination aus Zugkraft- und Drehmomentbelastung eine enorme Reduzierung hinsichtlich der übertragbaren Kräfte und Momente.

Beispielhaft wird dies in Abb. 4-5 für Bohrgestänge gezeigt. In der Abbildung ist erkennbar, dass bereits eine siebzigprozentige Ausnutzung des Drehmoment-

potentials auch zu einer Verringerung der zulässigen Axialkräfte auf etwa 70 Prozent des Nennwerts führt.

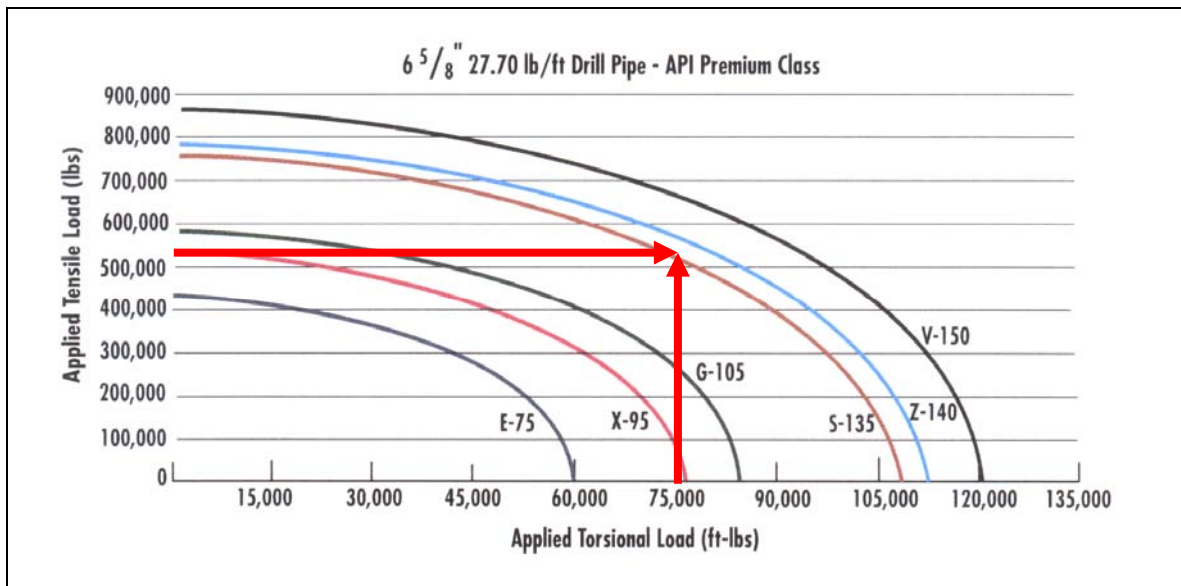


Abb. 4-5: Beispielhafte Darstellung der Abhängigkeit von gleichzeitiger Zugkraft- und Drehmomentbelastung auf API-Bohrgestänge [4-14].

Für das oben erwähnte 6.5/8 Zoll Bohrgestänge bedeutet dies, dass beispielsweise bei etwa 93 kNm Drehmomentbelastung (= Maximalwert der Tooljoints) nur noch ca. 3.000 kN Zugkraft übertragen werden können. Besonders diese Begrenzung des Drehmoments wird die erreichbare Bohrungslänge beim Einsatz im Rahmen des PPT-Verfahrens reduzieren (Abb. 4-6).

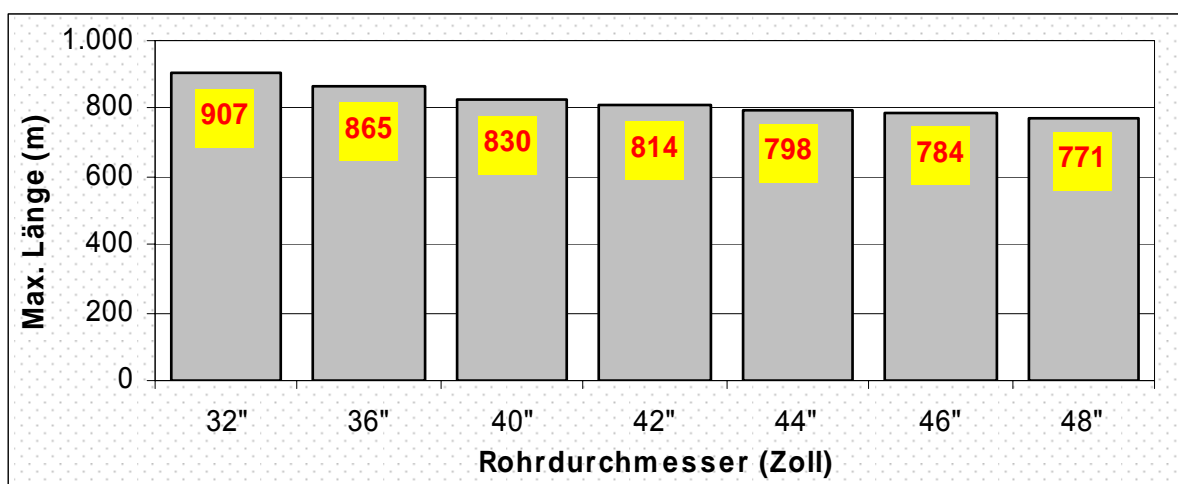


Abb. 4-6: Mittels PPT theoretisch erreichbare Verlegelängen in Abhängigkeit vom Rohrdurchmesser (bei Zugkräften von 3.000 kN und maximalen Druckkräften von 5.000 kN).

Aus diesem Grund sollte der Einsatz von relativ neu entwickelten Bohrgestängen (z.B. 6.5/8 Zoll Drillpipe / 27,7 lbs/ft / Class N / Grade V-150) mit hochfesten Verbindern (HT = High Torque bzw. XT = Extrem Torque Verbindern, z.B. XT69) angestrebt werden. Diese Bohrgestänge-Verbinder-Kombination kann axiale Kräfte bis zu ca. 4.754 kN und Drehmomente bis zu 207 kNm übertragen und damit wesentlich höhere mechanische Reserven bereitstellen [4-14].

Vermessungssystem

Die Durchführung der Pilotbohrung beim PPT-Verfahren entspricht exakt derjenigen beim HDD-Verfahren. Als Besonderheit ist jedoch anzuführen, dass durch die erwünschten, großen Bohrungsradien (> 800 m) und die Erfordernis, so genannte Dog Legs (Bohrlochknicken) unbedingt zu vermeiden, eine sehr hohe Vermessungsgenauigkeit erforderlich ist.

Die großen Bohrungsradien sind notwendig, um die auftretenden Zugkräfte während der Rohrverlegung ebenso zu vermeiden, wie zu hohe Spannungen im Rohrmaterial. Dog Legs müssen in erster Linie vermieden werden, um zu hohe Belastungen des Übergangsstücks zwischen Bohrgestänge und PPT-Maschine zu vermeiden, da es hier andernfalls schnell zum Abscheren des Bohrgestänges bzw. Übergangsstücks kommen kann.

Aus den genannten Gründen wird als Vermessungssystem das nach dem jeweiligen Stand der Technik genaueste Verfahren empfohlen. Im Moment wird dieser Stand der Technik durch ein Magnetic Guidance System (MGS) in Kombination mit einem künstlichen Magnetfeld (Coils) repräsentiert, wie es z.B. beim ParaTrack®-Verfahren zum Einsatz kommt [4-15, 4-16, 4-17].

Die Messgenauigkeit der beim MGS in den Bohrstrang integrierten Messsonde (engl.: Probe) liegt bei günstigen Rahmenbedingungen, d.h. ohne magnetische Beeinflussung, bei etwa folgenden Werten [4-21, 4-22, 4-23]:

- Inklination: $\pm 0,1^\circ$
- Azimut: $\pm 0,3^\circ$
- Tool Face: $\pm 0,1^\circ$

Als sicherer Einsatzbereich für dieses Messverfahren kann eine Bohrungstiefe bis ca. 40 m (in Einzelfällen auch deutlich mehr) angenommen werden. Die Mess-

genauigkeit liegt bei etwa 1% bis 2% der jeweiligen Tiefenlage, d.h. bei 40 m Tiefe bei etwa 0,4 m bis 0,8 m max. Abweichung [4-18, 4-19, 4-20, 4-21, 4-22, 4-23].

Anmerkung:

Wenngleich mit dem beschriebenen Messverfahren eine hohe Genauigkeit bei der Ermittlung der Bohrstrangposition möglich ist, darf nicht vernachlässigt werden, dass das Einhalten der vorgegebenen Soll-Trasse mit den jeweiligen Mindeststradien gerade in kiesigem Baugrund schwierig werden kann, da die notwendigen Steuerbefehle zur Richtungskorrektur des Bohrkopfes erfahrungsgemäß oft nur schwer umgesetzt werden können.

Hochdruckpumpe

Die Dimensionierung der Hochdruckpumpe orientiert sich beim Druck hauptsächlich an den Erfordernissen während der Pilotbohrung und hinsichtlich des erforderlichen Volumenstroms hauptsächlich am Bedarf während des Aufweit- und Einziehvorgangs.

Bei einer konventionellen HDD-Pilotbohrung ist mit maximalen Drücken an der Pumpe von ca. 150 bar bei maximalen Volumenströmen von ca. 1.000 L/min zu rechnen. Dies gilt bei Einsatz einer Jetting Assembly, nicht bei Einsatz eines Bohrlochsohlenmotors. Die entsprechenden Werte für den Aufweitschritt betragen etwa 3.000 L/min bei ca. 50 bar. Die hydraulischen Anforderungen beim Einziehvorgang liegen generell unter denjenigen des Aufweitvorgangs.

Die für das PPT-Verfahren abgeschätzten hydraulischen Parameter entsprechen aus heutiger Sicht etwa denjenigen des Aufweitschrittes beim HDD, d.h. ca. 3.000 L/min bei ca. 50 bar Druck. Aus diesen Vorgaben lässt sich der Leistungsbedarf einer solchen Pumpe bei einem Gesamtwirkungsgrad von 0,67 zu etwa 375 kW ermitteln (Formel F-4/6). Dieser Wert wird von handelsüblichen Hochdruckpumpen erreicht [4-24].

F-4/6	P_{pump}	=	$p \cdot Q / k$	[kW]
--------------	-------------------	---	-----------------	------

mit:

P_{pump}	=	Erforderliche Pumpenleistung	[kW]
p	=	Pumpendruck	[bar]
Q	=	Pumpenvolumenstrom	[l/min]
k	=	Konstante (hier: 400)	[-]

Misch- und Aufbereitungsanlage

Die Kapazität der Misch- und Aufbereitungsanlage wird ebenso wie bei den anderen betrachteten Verfahren direkt von der vorgesehenen Pumprate für die frische Bohrspülung beeinflusst. Aus Erfahrung empfiehlt es sich, die Kapazität der Aufbereitungsanlage etwa 30% höher anzusetzen, als die entsprechende Pumpenleistung. Bei einem maximalen Volumenstrom der frischen Bohrspülung von ca. 3.000 L/min sollte die Aufbereitungsanlage etwa eine Kapazität von ca. 4.000 L/min aufweisen [4-25].

Neben diesen rein volumenstromtechnischen Betrachtungen sind bei der Auslegung einer Aufbereitungsanlage weitere Faktoren, wie beispielsweise die Verteilung der Korngrößen in den Cuttings oder die spezifische Cuttingbelastung der Spülung von großer Bedeutung. Gegenwärtig existiert bereits eine sehr große Auswahl an entsprechenden Geräten und Verfahren, so dass für das PPT-Verfahren keine Neuentwicklungen erforderlich werden, sondern auf bewährte Einheiten zurückgegriffen werden kann [4-26].

Vortriebsmaschine

Die Vortriebs- bzw. PPT-Maschine ist ein wesentliches maschinentechnisches Element des gesamten Verfahrens. Diese Einheit beruht ganz wesentlich auf einer konventionellen MT-Maschine. Modifikationen sind hinsichtlich eines zentrischen Anschlusses für das Bohrgestänge notwendig. Zudem müssen die Fließwege der frischen sowie der mit Cuttings beladenen Bohrspülung verändert werden.

Letzteres ist erforderlich, da im ersten Ansatz die frische Bohrspülung durch das HDD-Bohrgestänge von der Rigsite zur PPT-Maschine gepumpt werden soll. Dort wird die Spülung im Brecherraum mit Bohrklein vermischt und im Anschluss durch eine spezielle Förderleitung im Produktrohr zur Pipesite fließen. Die erforderliche Energie für sämtliche Spülbewegungen wird durch die Hochdruckpumpe an der Rigsite bereitgestellt. In der PPT-Maschine sind in der ersten Auslegung keine weiteren Pumpen vorgesehen (Abb. 4-7).

Da die Entwicklung dieser Maschinenkomponente durch die *Herrenknecht AG* durchgeführt wurde, liegt diesem Prototypen eine serienmäßige AVN-Maschine dieses weltweit führenden Herstellers von MT-Maschinen zu Grunde.

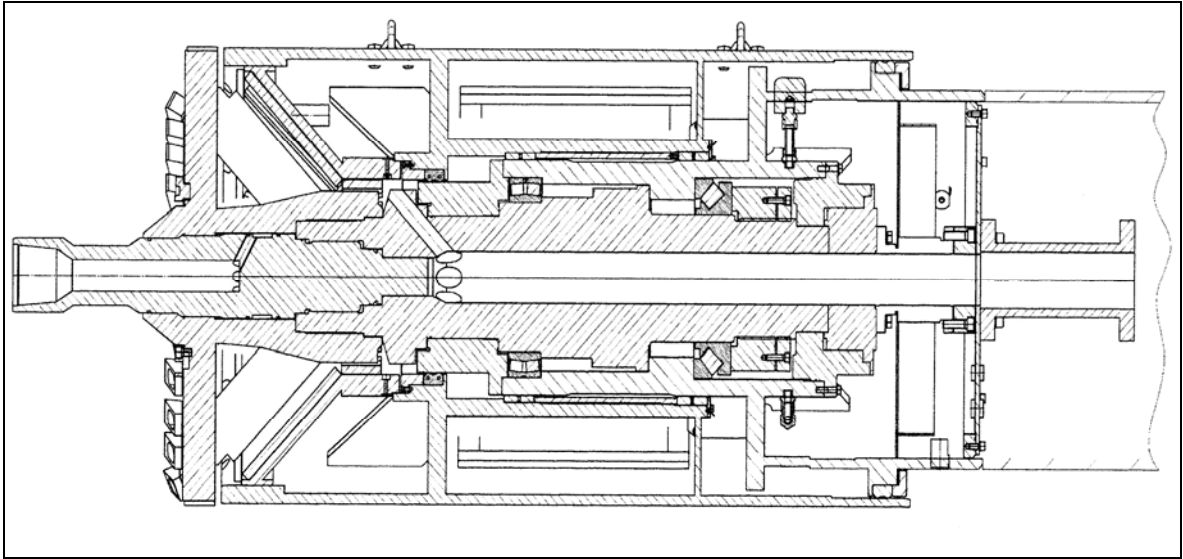


Abb. 4-7: Schnitt durch Entwurf für PPT-Maschine [4-27].

Die erste PPT-Maschine wurde im Frühjahr 2003 in den Werkhallen der *Herrenknecht AG* in Schwanau gefertigt und montiert (Abb. 4-8).



Abb. 4-8: Montage der ersten PPT-Maschine in Schwanau.

Ein potentieller Schwachpunkt des PPT-Verfahrens könnte die Auslegung der konventionellen MT-Schneidräder sein, die den Boden im Wesentlichen mechanisch und nicht wie bei den Räumern des HDD-Verfahrens hydraulisch lösen. Dadurch verkürzen sich die Standzeiten der Schneiradwerkzeuge, je nach Bodenbedingungen und Schneiradgröße, mitunter auf wenige hundert Meter.

Hier erscheint es in einem späteren Entwicklungsschritt sinnvoll zu sein, die hydraulische Komponente der Lösearbeit deutlich zu verstärken, da andernfalls die erreichbaren Verlegelängen gravierend hinter den Zielvorgaben zurück blieben. Erste konstruktive Ansätze in diese Richtung wurden bereits von der *Herrenknecht AG* eingeleitet, da der beschriebene Effekt der Verlängerung der Werkzeugstandzeit auch ein erhebliches Verbesserungspotential für den konventionellen Rohrvortrieb bietet.

Produktrohr

Gemäß der Zielvorgaben (Durchmesser, Material) ist ein groß dimensioniertes Stahlrohr für den Einsatz beim PPT-Verfahren vorgesehen. Das wesentliche Kriterium hierbei ist die sichere Übertragung der vom Pipe Thruster eingeleiteten Druckkräfte.

Für den vorgesehenen Durchmesserbereich (800 bis 1.200 mm) sind handelsübliche Rohre mit unterschiedlicher Wanddicke und aus unterschiedlichen Werkstoffen verfügbar. Generell kann angenommen werden, dass die für die unterschiedlichen Durchmesserbereiche abgeschätzten Kräfte von den üblicherweise verwendeten Rohren sicher übertragen werden können. So weist z.B. ein 1.000er Stahlrohr aus dem Werkstoff L360NB (alte Bezeichnung: StE 360.7) bei einer Wandstärke von 10 mm und einer Streckgrenze von 360 N/mm² eine zulässige Axialkraft von ca. 11.375 kN auf [4-28].

Besondere Anforderungen ergeben sich bei der Übertragung der von außen eingeleiteten Axialkräfte über eine Rohrumhüllung auf das eigentliche Stahlmaterial. Dieser Aspekt wird im folgenden Abschnitt näher betrachtet.

Pipe Thruster

Unter dem Pipe Thruster (Kurzform: Thruster) wird eine auf der Pipesite installierte Maschine verstanden, die die Bohranlage beim Einzug des Produktrohrs unterstützt. Die erforderlichen Vorschubkräfte werden von Hydraulikzylindern aufgebracht und über eine Klemmvorrichtung auf das Produktrohr übertragen.

Auch diese Maschineneinheit wurde im Wesentlichen von der *Herrenknecht AG* konstruiert und wies im ersten Entwurf zwei Klemmringe auf, die unabhängig voneinander angesteuert und über Hydraulikzylinder bewegt werden konnten. Dabei war sowohl die Übertragung von Schubkräften für den verfahrensgemäßen

Rohreinschub ins Bohrloch, als auch die Übertragung von Zugkräften zur Rohrborgung im Havariefall vorgesehen (Abb. 4-9).

Die Übertragung dieser Vorschubkräfte sollte über Klemmen erfolgen, die hydraulisch geöffnet und geschlossen werden konnten sowie über Räder auf dem Rohrkörper verfahrbar waren. Durch Austausch der Inlets (d.h. der Innenstücke bzw. Distanzstücke) sollte es möglich sein, einen Thruster für unterschiedliche Rohrdurchmesser verwenden zu können.

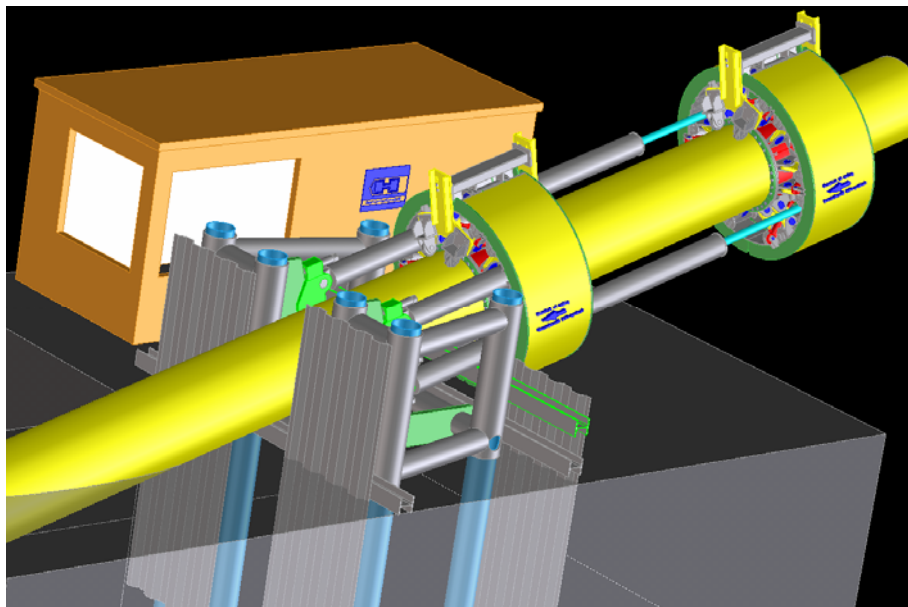


Abb. 4-9: Erster Entwurf eines Pipe Thrusters (Stand 2003) [4-27].

Um eine bestimmte Axialkraft übertragen zu können, ist es bei unterschiedlichen Rohrdurchmessern erforderlich, entweder die Länge der Klemmfläche variieren zu können (d.h. bei kleineren Rohrdurchmessern werden längere Klemmflächen erforderlich, da der Rohrumfang je Längeneinheit kleiner wird) oder geringere übertragbare Kräfte bei kleineren Rohrdurchmessern zu akzeptieren.

Aus Gründen einer einfachen Handhabung auf den zukünftigen Bohrlokalationen wurde entschieden, die Klemmflächenlänge konstant zu halten, da eine rohrspezifische Anpassung nicht ohne erheblichen maschinenbautechnischen und montagetechnischen Aufwand möglich wäre. Hierdurch wäre die Praxistauglichkeit negativ beeinflusst worden.

Im weiteren Verlauf der Entwicklung und Konstruktion musste die Auslegung überarbeitet und optimiert werden. Dadurch wurde die Thruster Unit robuster und funktionssicherer, allerdings auch erheblich größer und schwerer als geplant

(Abb. 4-10). So wären für den Transport dieser Einheit, die auch losgelöst vom PPT-Verfahren im Zuge normaler HDD-Projekte eingesetzt werden soll (Unterstützung der Bohranlage bzw. Rohrbergung im Havariefall bzw. Einschub von Rohren bei Anlandungen), ein 20ft-Container für die Steuereinheit und die Energieversorgung sowie ein Schwerlasttransport des Thrusters (Gewicht ca. 60 t) erforderlich.

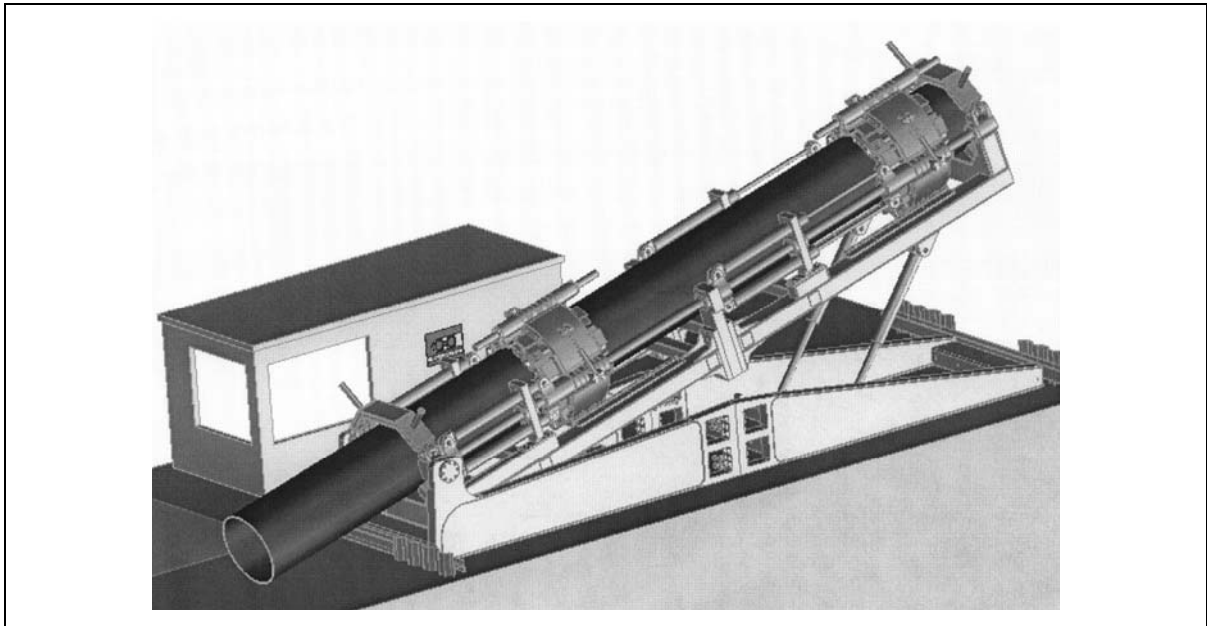


Abb. 4-10: Überarbeiteter Entwurf des Pipe Thrusters (Stand 2004) [4-29].

Beim aktuellen Design (2006) wurde wiederum der Grundgedanke vom Anfang der Entwicklung aufgegriffen, um die Einheit leichter und kostengünstiger herstellen und betreiben zu können (Abb. 4-11).

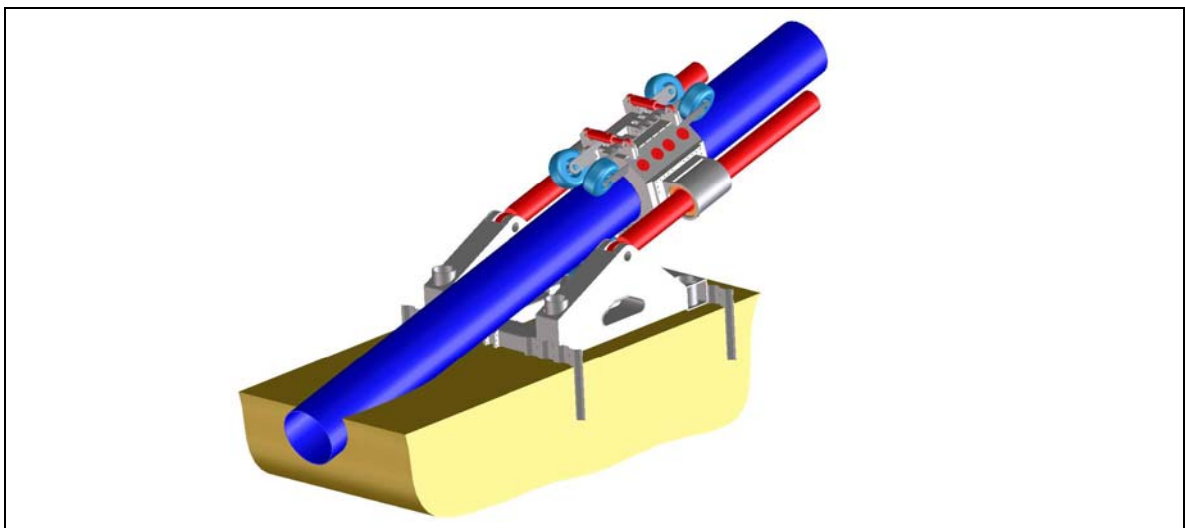


Abb. 4-11: Überarbeiteter Entwurf des Pipe Thrusters (Stand 2006) [4-29].

Ein wesentliches Element des Pipe Thrusters stellt die Übertragung der Axialkräfte durch die Umhüllung auf das eigentliche Stahlrohr mit der hohen Materialfestigkeit dar. Diese Umhüllungen werden in der Regel bereits werkseitig in einem standardisierten Arbeitsprozess aufgebracht (Abb. 4-12).

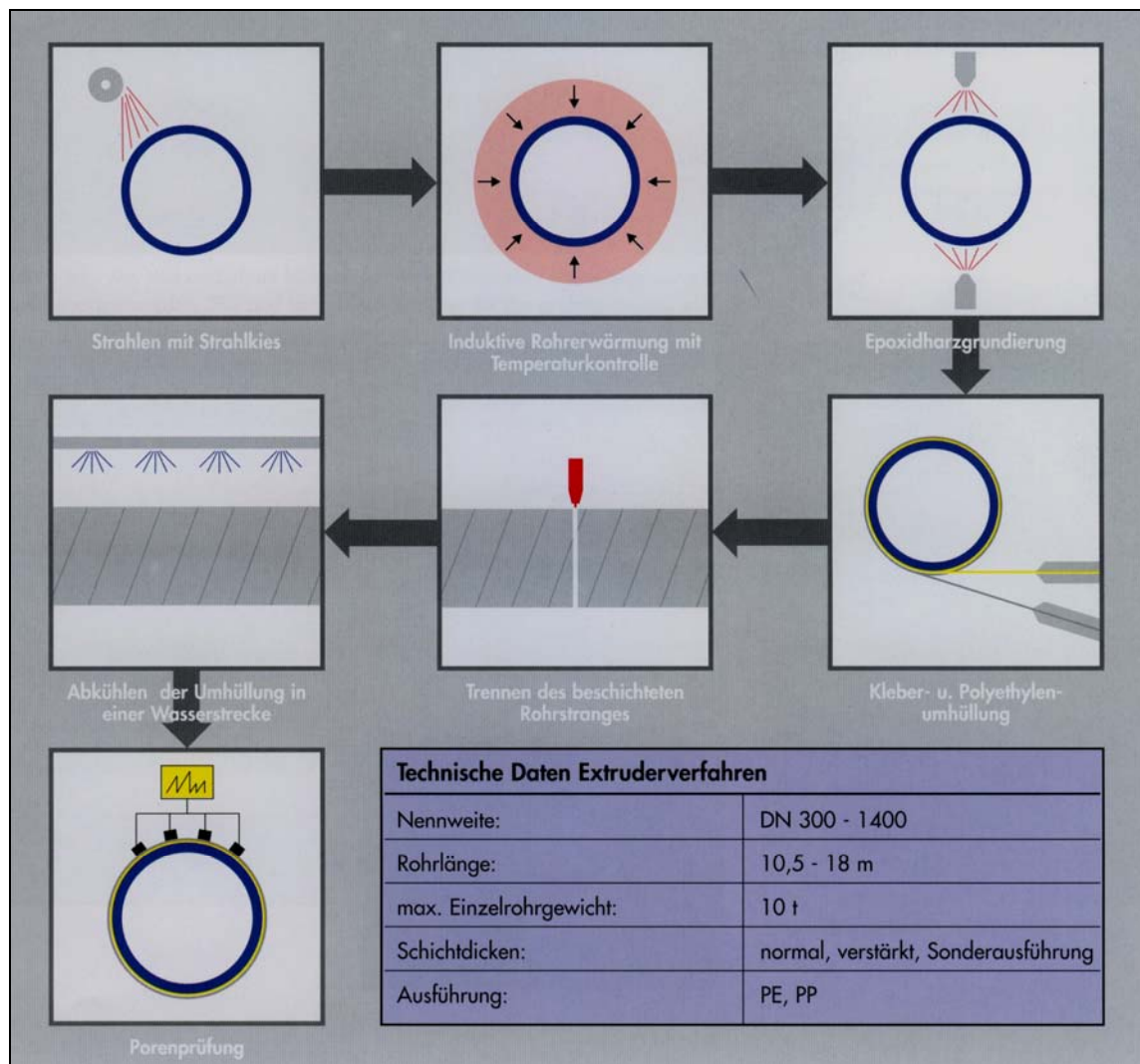


Abb. 4-12: Arbeitsablauf bei der werkseitigen Umhüllung von Stahlrohren [4-32].

Bei den üblichen Umhüllungen handelt es sich um Polyolefine (Polyethylen und Polypropylen) und Duroplaste (Epoxidharzpulver). Die Auswahl des Umhüllungssystems hängt aus technischer Sicht unter anderem von der Beschaffenheit des Baugrunds ab. Zudem sind bei der Auswahl des optimalen Umhüllungssystems häufig wirtschaftliche Aspekte von Bedeutung [4-30, 4-31].

Polyolefine sind in Anlehnung an DIN 30 670 und DIN 30 678 häufig als Dreischichtsysteme aufgebaut und bestehen aus einer Epoxidharz-Grundsicht,

einem Kleber und einer Polyethylen- oder Polypropylen-Deckschicht [4-33, 4-34, 4-35].

Umhüllungen aus Duroplasten sind in Anlehnung an DIN 30 671 meistens als Zweischichtsysteme aufgebaut und bestehen aus einer Epoxidharz-Pulverbeschichtung und einer Faserzementmörtel-Ummantelung [4-36, 4-37].

Mitunter kommen als Deckschicht auch Glasfaserkunststoffe (GFK) zum Einsatz. Als Basismaterial für die glasfaserverstärkten Duroplaste werden ungesättigte Polyesterharze (UP) oder Epoxidharze (EP) verwendet, die mittels eines zweiten Klebers aus EP-Flüssigharz fest mit der Epoxidharz-Pulverbeschichtung verbunden sind.

Anmerkung:

Für die Vervollständigung dieser Umhüllung an den Schweißnähten, während der Erstellung des Rohrstrangs auf der Baustelle, gelten besondere Bedingungen. Dieser Bereich ist in diesem Zusammenhang von geringerem Interesse, da der Pipe Thruster flexibel angesetzt werden kann. Für die Übertragung der Vorschubkräfte können die Schweißnahtbereiche ausgelassen werden.

Das entscheidende Kriterium ist die Scherfestigkeit der Umhüllung auf dem Rohrkörper. Diese wird durch den minimalen Scherwiderstand der einzelnen Schichten der Umhüllung bestimmt und kann in geeigneten Apparaturen im Labor ermittelt und in der Einheit N/mm^2 angegeben werden.

Als minimaler Wert für den Scherwiderstand von PE- und PP-Umhüllungen auf Stahlrohren wurde für die Auslegung des PPT-Verfahrens ein Wert von $0,5 \text{ N/mm}^2$ angenommen. Je nach Rohrdurchmesser (und damit spezifischer Rohroberfläche je Längeneinheit) ergeben sich somit unterschiedlich große Übertragungsflächen, die für die Einleitung der vom Thruster erzeugten Vorschub- bzw. Rückzugskräfte erforderlich sind.

Als weiterer Auslegungsgrenzwert wurde angenommen, dass die (radiale) Druckkraft der Klemmvorrichtungen auf die Umhüllung einen Wert von ca. 10 N/mm^2 (= 100 bar) nicht überschreiten sollte, um den zulässigen Eindruckwiderstand der Umhüllung einzuhalten und eine Beschädigung der Umhüllung durch radiale Druckkräfte zu vermeiden.

Um die angestrebten 2.500 kN pro Klemmeinheit mit diesen Werten zu erreichen, werden für die vorgesehenen Rohrdurchmesser etwa 5 m^2 Klemmfläche und damit

in Abhängigkeit vom Rohrdurchmesser die folgenden Klemmlängen benötigt:

DN 800	→	2,00 m
DN 900	→	1,76 m
DN 1.000	→	1,60 m
DN 1.100	→	1,46 m
DN 1.200	→	1,31 m

Da aus handhabungs- und fertigungstechnischen Gesichtspunkten vorgesehen ist, die Klemmlänge für unterschiedliche Rohrdurchmesser konstant zu halten, ergeben sich z.B. bei einer fixen Klemmlänge von 1,31 m die folgenden übertragbaren Kräfte:

DN 800	→	1.671 kN
DN 900	→	1.880 kN
DN 1.000	→	2.089 kN
DN 1.100	→	2.298 kN
DN 1.200	→	2.507 kN

Die Klemmvorrichtungen wurden ständig weiterentwickelt, wobei die Klemmkräfte zunächst von radial angebrachten Hydraulikzylindern aufgebracht werden sollten (2003). In der nächsten Entwicklungsphase (2005) wurde die in Abb. 4-13 dargestellte Keillösung favorisiert.

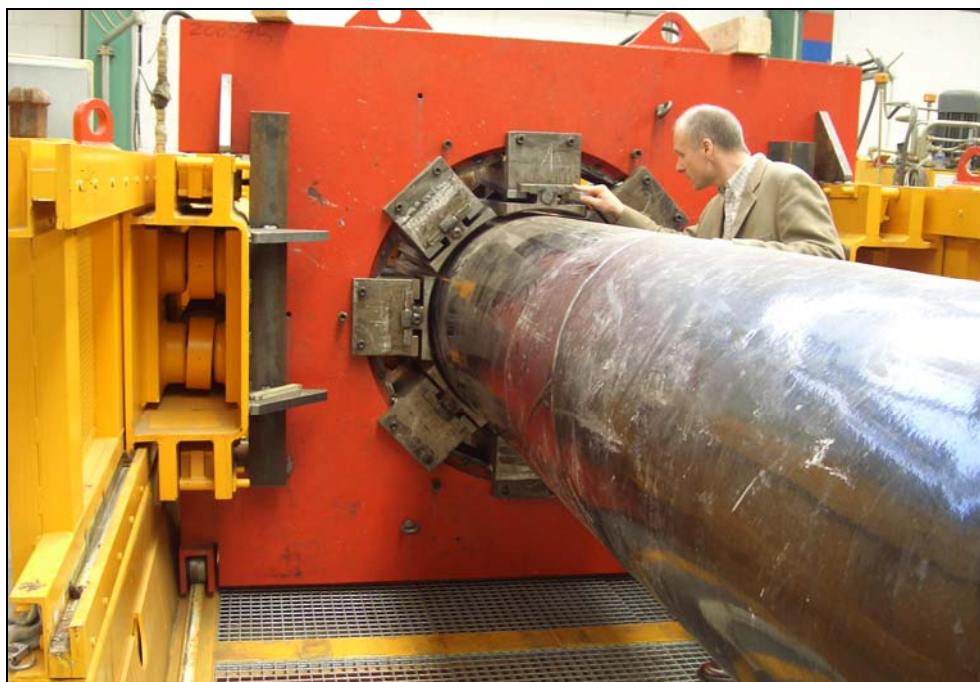


Abb. 4-13: Versuchsstand der Fa. *Herrenknecht AG* für die Übertragung der Klemmkräfte.

Bei dem ersten, im Jahr 2006 gefertigten Pipe Thruster wurde die ursprüngliche Variante, mit radial an der Klemmvorrichtung angebrachten Hydraulikzylindern, umgesetzt (Abb. 4-14).



Abb. 4-14: Erster Pipe Thruster der Fa. *Herrenknecht AG* auf der Hannover Messe 2006.

Zwischenergebnis

Hinsichtlich der für das PPT-Verfahren benötigten Systemkomponenten kann festgehalten werden, dass aus heutiger Sicht lediglich die auf konventionellen MT-Maschinen basierende Vortriebsmaschine entsprechend modifiziert werden muss. Hinzu kommt die Neuentwicklung des auch unabhängig vom PPT-Verfahren nutzbaren Pipe Thrusters.

4.2.2 Infrastruktur

Zur PPT-spezifischen Infrastruktur gehören insbesondere die folgenden zwei Komponenten:

- Widerlager und
- Spülungsbecken.

Verfahrensbedingt werden auf beiden Arbeitsseiten, d.h. sowohl auf der Rig- als auch auf der Pipesite Widerlager und Spülungsbecken benötigt.

Widerlager

Die vorzusehenden Widerlager müssen die während des Verlegevorgangs auftretenden maximalen Horizontalkräfte sicher aufnehmen können. Gemäß der bisherigen Ausführungen wird eine Bohranlage mit maximal ca. 4.000 kN Zugkraft sowie eine Thruster Unit mit maximal ca. 5.000 kN Schub- bzw. Zugkraft als geeignete Gerätegröße vorgesehen.

Demzufolge müssen die Widerlager an der Rigsite bzw. an der Pipesite Kräfte von bis zu 4.000 kN bzw. bis zu 5.000 kN sicher aufnehmen können, auch wenn die Kombination dieser Kräfte im praktischen Einsatz nur in Ausnahmesituationen zu erwarten ist.

Spülungsbecken

Im Gegensatz zum HDD-Verfahren wird das Produktrohr beim PPT-Verfahren direkt mit der Bohrlochaufweitung eingebaut. Dadurch verringert sich der Bedarf an Bohrspülung im Kreislauf erheblich. Zudem ist ein Auffangen des beim Rohreinzug verdrängten Spülvolumens in geeigneten Spülungsbecken nicht erforderlich.

Aus diesem Grund erscheinen Spülungsbecken mit einer Kapazität von jeweils ca. 100 m³ als ausreichend. Zu einem späteren Zeitpunkt, d.h. nach diversen Feldeinsätzen des PPT-Verfahrens, kann gegebenenfalls auf Spülungsbecken verzichtet werden. In diesem Fall müssen die Ein- und Austrittsgruben so dimensioniert werden, dass sie als Zwischenlager während des Verlegevorgangs ausreichen.

4.3 Feldversuche

Im Jahr 2003 wurden auf dem Betriebsgelände der Fa. *Herrenknecht AG* in Schwanau-Allmannsweier insgesamt drei größere Feldversuche mit dem PPT-Verfahren durchgeführt:

- Feldversuch 1 (April 2003)
- Feldversuch 2 (Mai 2003)
- Feldversuch 3 (Oktober 2003)

Lokation der Feldversuche

Die Ortschaft Schwanau-Allmannsweier liegt im Südwesten der Bundesrepublik Deutschland zwischen den Städten Offenburg im Norden und Freiburg im Süden. Aus geologischer Sicht gehört diese Region zum Oberrheintalgraben und ist im oberflächennahen Bereich durch quartäre Flussablagerungen wie Sande und Kiese gekennzeichnet. Damit werden exakt diejenigen geologischen Bedingungen abgebildet, für die das PPT-Verfahren entwickelt wurde [4-38, 4-39, 4-40].

Das Versuchsgelände liegt südlich des Betriebsgeländes der Fa. *Herrenknecht AG*, weist etwa die Abmessungen 250 m (Länge) x 25 m (Breite) auf und ist im Wesentlichen in einen Bohrungsabschnitt und einen Rohrbauabschnitt unterteilt (Abb. 4-15).



Abb. 4-15: Versuchsgelände für die PPT-Feldversuche in Schwanau-Allmannsweier.

Zwischen der Ein- und Austrittsgrube im Bohrungsbereich wurde der Mutterboden seitlich abgeschoben, während im Rohrbaubereich die ursprüngliche Geländeoberfläche wegen der geringeren Maschinenbewegungen beibehalten wurde. Zusätzlich wurde im Bohrungsbereich sowie im Aufstellbereich der HDD-Anlage eine tragfähige Schotterschicht eingebracht.

Systemkomponenten

Die wesentlichen, unten aufgeführten Systemkomponenten der Versuche sind in Abb. 4-16 dargestellt.

- | | |
|----------------------------|----------------------|
| • Bohrgerät | • Recyclinganlage |
| • Steuerstand | • Bohrklein |
| • Gestängelager | • Versorgungsleitung |
| • Powerpack für Bohranlage | • Pumpe |
| • Generator | • Förderleitung 1 |
| • Hochdruckpumpe | • Förderleitung 2 |
| • Bohrspülmischanlage | • Förderleitung 3 |
| • Spülungstank | • Hydraulikbagger |
| • Bentonitlager | |

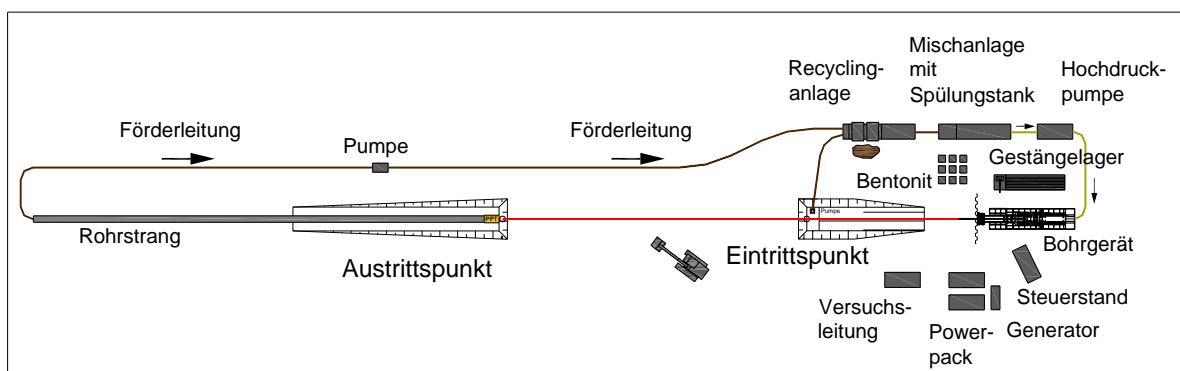


Abb. 4-16: Prinzipieller Versuchsaufbau für die PPT-Feldversuche in Schwanau-Allmannsweier.

Für die Durchführung der Versuche wurden die nachfolgend aufgeführten Hauptkomponenten ausgewählt (Abb. 4-17 bis 4-20):

Bohrgerät

Hersteller:	Herrenknecht AG
Typ:	HK400M
Maximale Zugkraft:	4.000 kN
Maximales Drehmoment:	120 kNm

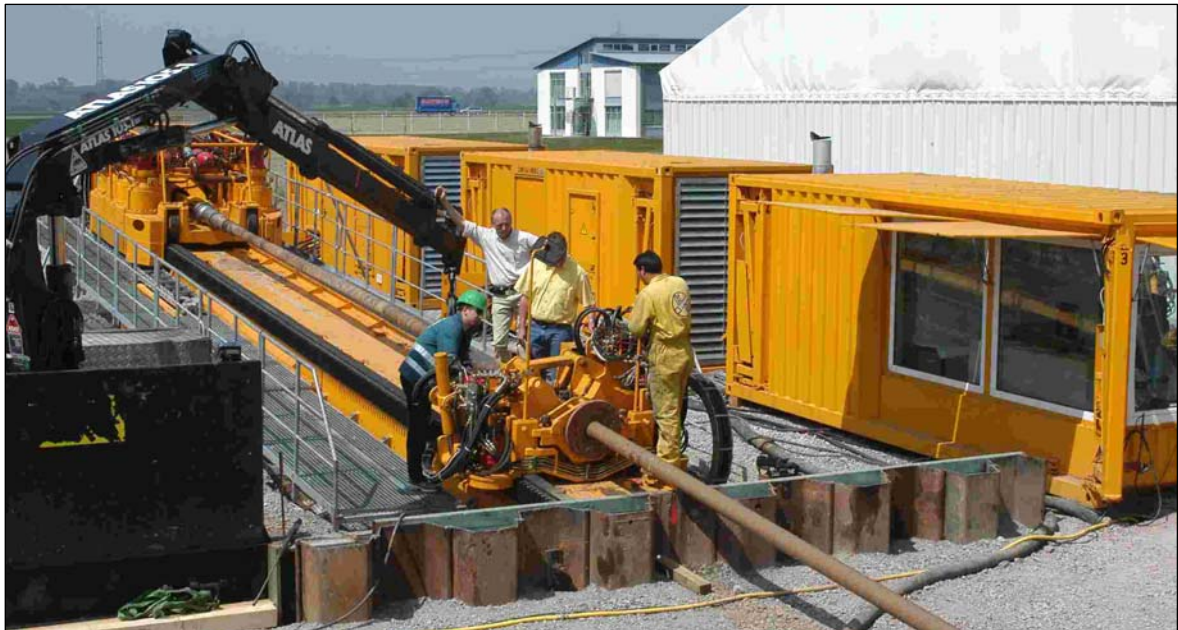


Abb. 4-17: Bohrgerät HK400M auf dem Versuchsgelände.

Bohrstrang

Typ:	6.5/8" S-135 Drillpipe
Maximale Zugkraft:	4.274 kN (neuwertiges Gestänge)
Maximales Drehmoment:	186 kNm (neuwertiges Gestänge)



Abb. 4-18: Bohrgestänge der PPT-Versuche.

Vortriebsmaschine

Hersteller:	Herrenknecht AG
Typ:	modifizierte AVN 800
Außendurchmesser:	1.290 mm (Schneidrad), 1.280 (Körper)



Abb. 4-19: Montage der angepassten PPT-Maschine vor Versuchsbeginn.

Rohrstrang

Dimension:	1.066 mm x 13,4 mm
Material:	Stahl X52



Abb. 4-20: Montage des Rohrstrangs für die Versuche in Schwanau-Allmannsweiler.

Pipe Thruster

Auf einen Thruster konnte bei den geplanten Versuchen verzichtet werden, da die erforderliche Axialkraft aufgrund der relativ kurzen Bohrstrecke (ca. 100 m) allein von der Horizontalbohranlage aufgebracht werden sollte.

Infrastruktur

Die wesentlichen Komponenten der Infrastruktur für die Durchführung der Versuche in Schwanau-Allmansweier waren

- die Widerlager und
- die Spülungsbecken.

Widerlager

Das Widerlager für die große Horizontalbohranlage wurde in Form gerammter Spunddielen erstellt. Diese wurden später kraft- und formschlüssig mit der Bohranlage verbunden.



Abb. 4-21: Widerlager für die Horizontalbohranlage.

Spülungsbecken

Auf Spülungsbecken wurde, abgesehen von den Ein- und Austrittsgruben, verzichtet, da davon ausgegangen werden konnte, dass das gesamte Spülvolumen in einem geschlossenen Kreislauf ohne zusätzliche Speicherkapazität gepumpt werden konnte.

4.3.1 Feldversuch 1 (April 2003)

Nach Anschluss aller Systemkomponenten und einer Prüfung der Funktionsfähigkeit, wurde eine Pilotbohrung mittels eines Stering Tools in Kombination mit einem künstlichen Magnetfeld (TruTrack®) erstellt. Aufgrund der erwarteten Baugrundbedingungen wurde als Bohrkopf ein Rollenmeißel (9.7/8“) ausgewählt (Abb. 4-22). Die erforderlichen Steuerbarkeit des Bohrkopfes wurde durch den Einbau eines Bent-Subs (Knickstück mit 1° Abwinkelung) in den Bohrstrang sichergestellt.



Abb. 4-22: Rollenmeißel der Pilotbohrung.

Die geplante Pilotbohrung war 140 m lang und sollte mit einem vertikalen Krümmungsradius von 600 m aufgefahen werden. Die kurze Bohrstrecke in Verbindung mit den erforderlichen Krümmungsradien erforderte sehr flache Ein- bzw. Austrittswinkel von 4,5° bzw. 5°.

Diese Zielvorgaben konnten im Wesentlichen erreicht werden. Durch die angetroffenen Baugrundverhältnisse sowie die tatsächlichen Baustellenbedingungen (Baugrubendimensionen etc.) verkürzte sich die (horizontale) Bohrstrecke in der Praxis auf 101 m. Der vertikale Bohrungsradius lag dabei zwischen 489 m und 614 m und der minimale horizontale Bohrradius betrug etwa 826 m. Die maximale Überdeckung im mittleren Bereich der Bohrung (Achse) lag bei ca. 3,50 m (Abb. 4-23).

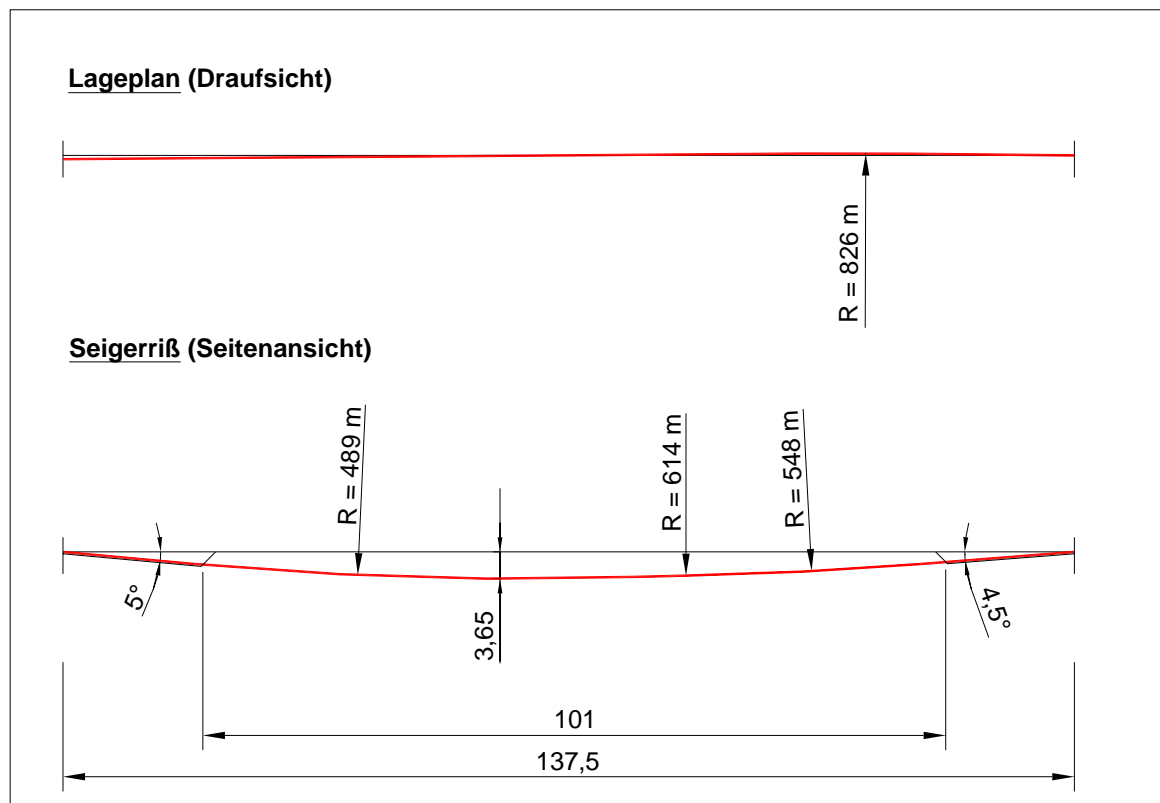


Abb. 4-23: Darstellung der Pilotbohrung.

Wie erwartet erwies sich der Boden als steinhaltig. Um die erforderlichen Vorschubkräfte aufbringen zu können, war eine Stabilisierung des Bohrgestänges zwischen Bohranlage und Eintrittspunkt durch ein Casingrohr erforderlich. Dennoch waren die auftretenden Vorschubkräfte mit ca. 400 kN sehr hoch und führten zu einer extremen Belastung einzelner Bohrstangen (Abb. 4-24).



Abb. 4-24: Hohe Beanspruchung einzelner Bohrstangen während der Durchführung der Pilotbohrung.

Nach Fertigstellung der Pilotbohrung wurde der Versuch abgebrochen, da die PPT-Maschine aufgrund eines Fertigungsfehlers nicht einsatzbereit war. Dies führte zu einer Verzögerung von einigen Wochen.

Ergebnis

Als wesentliches Ergebnis des ersten Feldversuchs kann festgehalten werden, dass die Pilotbohrung im Wesentlichen innerhalb der vorgesehenen Toleranzen ausgeführt werden konnte. Allerdings wurde der vorgegebene Mindestradius von 500 m wegen des steinigen Baugrundes nicht an allen Stellen eingehalten.

4.3.2 Feldversuch 2 (Mai 2003)

Ablauf

Zunächst wurde der Rohrstrang erneut mit den erforderlichen Ver- und Entsorgungsleitungen für die PPT-Maschine ausgerüstet. Hierzu gehörte neben den elektrischen und hydraulischen Leitungen zum Antrieb und zur Steuerung der PPT-Maschine auch die Förderleitung für die mit Bohrklein beladene Bohrspülung (Abb. 4-25).



Abb. 4-25: Förder- und Versorgungsleitungen im Produktrohr.

Da das zwischen erstem und zweitem Versuch im Bohrloch verbliebene Bohrgestänge beträchtlich eingesedimentiert war, wurde zunächst ein Räumgang mit einem speziellen 10“ Holeopener durchgeführt (Abb. 4-26). Durch diesen Arbeitsschritt konnten Ablagerungen aus dem Bohrloch ausgetragen werden und

gleichzeitig wurde frische Bohrspülung ins Bohrloch eingebracht. Dadurch konnte die Gestängereibung deutlich reduziert werden.



Abb. 4-26: Ende des Aufweitgangs zur Reduzierung der Bohrlochreibung.

Während dieses Arbeitsgangs konnten auch die anderen Komponenten wie z.B. die Transferpumpen etc. auf ihre Funktionstüchtigkeit getestet werden. Anschließend wurde die zwischenzeitlich modifizierte und vormontierte PPT-Maschine mit dem vorbereiteten Rohrstrang verbunden. Da die PPT-Maschine in der bestehenden Versuchsanordnung einen größeren Durchmesser aufwies als das Produktrohr (Abb. 4-27), musste im Falle einer rückwärtigen Bewegung mit der Gefahr des Festwerdens im Bohrloch gerechnet werden.



Abb. 4-27: Übergangsbereich zwischen Produktrohr und PPT-Maschine.

Im nächsten Arbeitsschritt wurde die PPT-Maschine endmontiert und getestet (Abb. 4-28 und 4-29).



Abb. 4-28: Montage der Hauptantriebswelle.



Abb. 4-29: Test der Düsen im Brecherraum vor Montage des Schneidrads.

Der gesamte Rohrstrang mit der angeschweißten PPT-Maschine wurde axial in Richtung des Bohrstrangs ausgerichtet, um zu enge Biegeradien in den Bereichen außerhalb des Bohrlochs zu vermeiden. (Abb. 4-30 und 4-31).



Abb. 4-30: Ausrichtung des Rohrstrangs mit PPT-Maschine.



Abb. 4-31: Ausgerichteter Rohrstrang mit PPT-Maschine und fertig verschraubtem Bohrgestänge.

Im Anschluss konnte mit der eigentlichen Versuchsdurchführung begonnen werden. Die PPT-Maschine wurde mit drehendem Schneidrad und unter Einsatz von Bohrspülung von der Bohranlage zur Eintrittsgrube gezogen. Während dieses Vorziehens wurde auch die axiale Verschiebung des Schneidrades erfolgreich getestet.

Die PPT-Maschine tauchte dann in die mit Bohrspülung gefüllte Eintrittsgrube ein und wurde langsam Richtung Stirnseite der Grube gezogen (Abb. 4-32, 4-33). Die Drehzahl des Schneidrads lag, basierend auf den entsprechenden Referenzwerten aus dem Microtunneling, bei weniger als zehn Umdrehungen pro Minute.

Unmittelbar nachdem das Schneidrad Kontakt mit der Stirnseite der Baugrube hatte, stieg das Drehmoment auf ca. 20 kNm an. Nach wenigen Dezimetern Bohrstrecke fiel das Drehmoment aufgrund eines Gestängebruchs dann jedoch schlagartig ab.

Die Rohrleitung mit der PPT-Maschine wurde zurückgezogen, während das Bohrgestänge zunächst an der aktuellen Position im Bohrloch belassen wurde. Nach der Bergung der PPT-Maschine wurde ersichtlich, dass der Bruch unmittelbar am Schneidrad aufgetreten war (Abb. 4-34).

Da die Bruchstelle hinsichtlich ihrer Position im Bohrstrang nun bekannt war, konnte nach der Bergung der PPT-Maschine auch das Bohrgestänge mit dem Gegenstück der Bruchstelle von der Bohranlage die kurze Strecke in die Baugrube zurück geschoben werden (Abb. 4-35).

Aufgrund des durch den Gestängebruch notwendig gewordenen, zusätzlichen Konstruktions- und Fertigungsaufwands, wurde der zweite Versuch abgebrochen.



Abb. 4-32: Eintritt der PPT-Maschine in die Eintrittsgrube.



Abb. 4-33: Position der PPT-Maschine unmittelbar nach dem vermuteten Gestängebruch.



Abb. 4-34: Zurückgezogene PPT-Maschine mit Bruchstelle.



Abb. 4-35: Gegenstück der Bruchstelle am Gestänge.

Ergebnis

Während des zweiten Feldversuchs konnten die wesentlichen mechanischen Funktionen der PPT-Maschine (Rotation, axiale Schneidradverschiebung) ebenso wie der mit frischer (d.h. nicht Cutting-beladener) Bohrspülung betriebene Bohrspülungskreislauf erfolgreich getestet werden.

Als problematisch hat sich die Übertragung der Zugkraft und des Drehmoments vom Bohrgestänge auf die PPT-Maschine (mechanisches Problem) sowie der Rücktransport der mit Bohrklein beladenen Bohrspülung durch die Förderleitung im Produktrohr (Spülung sammelte sich in der Eintrittsgrube) erwiesen.

Das Ziel eines geschlossenen Bohrspülungskreislaufs wurde zu diesem Zeitpunkt nicht erreicht. Grund hierfür war die geringe Eindringtiefe der PPT-Maschine, die bei nur etwa 50 cm lag. Der Fließweg durch den Ringspalt wies damit erheblich weniger Fließwiderstand auf als der Fließweg durch das Förderrohr (und damit über den Oberbogen). Es wurde angenommen, dass sich die Verhältnisse bei den Fließwiderständen nach kurzer Bohrstrecke der PPT-Maschine (wenige Meter) ändern würden. Damit wäre der Bohrspülungskreislauf wie geplant geschlossen.

4.3.3 Feldversuch 3 (Oktober 2003)

Ablauf

Für den dritten PPT-Feldversuch wurde die überarbeitete und modifizierte PPT-Maschine im Juli 2003 an den Produktrohrstrang angeschweißt (Abb. 4-36) und die erforderlichen Ver- und Entsorgungsleitungen im Inneren des Produktrohres mit der PPT-Maschine verbunden.

Anschließend wurde der Bohrstrang mit der PPT-Maschine verschraubt. Die mechanische Verstärkung des Übergangsbereichs musste kurzzeitig demontiert werden, da dem mobilen Klemm-Brech-Gerät ansonsten nicht ausreichend Grifffläche zur Verfügung gestanden hätte.

Des Weiteren wurde der Oberbogen vor Versuchsbeginn hinsichtlich der axialen Ausrichtung mit dem Bohrstrang sowie hinsichtlich des Krümmungsradius bzw. der Belastung der einzelnen Rollenböcke optimiert. Die geschilderten Maßnahmen wurde im Hinblick auf eine Minimierung der Belastungen der Bauteile durchgeführt.



Abb. 4-36: Modifizierte PPT-Maschine mit mechanischer Verstärkung im Übergangsbereich Bohrgestänge/Schneidrad.

Als Reaktion auf die hydraulischen Probleme aus den früheren Versuchen wurde aus einer, in eine Betonmauer eingelassenen Anfahrdichtung, eine ähnliche Anfahrsituation in der Baugrube hergestellt, wie sie von konventionellen MT-Baustellen bekannt ist (Abb. 4-37).

Anmerkung:

Bei zukünftigen Projekten ist in diesem Zusammenhang auch der Einsatz eines ca. 20 – 30 m langen Standrohrs zu prüfen. Dieses kann nach der Rohrverlegung gegebenenfalls geborgen und wieder verwendet werden.

Mit Hilfe dieser Betonmauer wurde das Erreichen mehrerer Ziele angestrebt. Zunächst sollte ein großflächiges Zusammenstürzen des Bodens über der PPT-Maschine verhindert werden, da dies aufgrund der geringen Deckung im Einfahrbereich zu erwarten wäre. Darüber hinaus sollte die PPT-Maschine während der Einfahrstrecke seitlich gestützt werden. Dies erschien erforderlich, um die durch die Drehung des Schneidrades hervorgerufene Tendenz der Maschine, sich in Drehrichtung des Bohrgestänges aus der Achse der Pilotbohrung herauszubewegen, zu unterbinden.

Ein weiteres Ziel im Zusammenhang mit dem Einsatz der Anfahrdichtung war das Verhindern des Fließens von Bohrspülung entlang der PPT-Maschine bzw. entlang des Produktrohres in die Baugrube. Stattdessen sollte die Bohrspülung durch die vorgesehene Förderleitung im Inneren des Produktrohres fließen und damit den geplanten Spülungskreislauf vervollständigen.



Abb. 4-37: Betonwand mit Anfahrtdichtung an der Stirnseite der Baugrube.

Bei der Versuchsdurchführung drang die PPT-Maschine nur unwesentlich tiefer (insgesamt ca. 78 cm) in den Baugrund ein als bei dem vorherigen Versuch (Abb. 4-38). Die während der Durchführung erreichte Vortriebsleistung lag bei ca. 4 cm/min und konnte über einen Zeitraum von ca. 7 Minuten konstant gehalten werden. Das Drehmoment bei kleinstem Brecherabstand betrug ca. 40 bis 50 kNm, stieg jedoch bei einer Erhöhung der Vortriebsgeschwindigkeit signifikant an.

Hinsichtlich des Spülungskreislaufs ist anzumerken, dass eine Etablierung des Förderstroms allein durch die Hochdruckpumpe an der Rigsite (Volumenstrom ca. 80 bis 110 m³/h) nicht erreicht werden konnte. Zusätzlich musste der Bypass hinter der PPT-Maschine geöffnet werden, wodurch etwa weitere 40 m³/h Flüssigkeitsstrom in die Förderleitung eingespeist werden konnten. Eine alleinige Erhöhung der Förderleistung der Hochdruckpumpe führte nicht zu den gewünschten Ergebnissen, sondern erhöhte die Gefahr der Spülungsausbrüche an der Oberfläche deutlich.

Auch bei einer günstigen Kombination aus Hochdruckpumpe und zusätzlicher Speisepumpe (für Bypass in PPT-Maschine) war für die Ingangsetzung und Aufrechterhaltung des Spülungskreislaufs die Erzeugung eines Unterdrucks in der Förderleitung notwendig. Für diese Leistung wurde eine Förderpumpe Typ KBK 150/400 eingesetzt.

Die Bohrspülungsverluste (Austritte an die Oberfläche) beliefen sich während der Versuchsphase auf ca. 20 m³/h. Diese Spülsausrüche traten besonders vor und seitlich der Betonmauer auf.



Abb. 4-38: Endposition des Produktrohrs beim Abbruch der Versuche.

Trotz der beschriebenen Maßnahmen kam es wiederholt zu Sedimentationen und Verstopfern in den verschiedenen Abschnitten der Förderleitung. Hierdurch wurden aufwendige Reinigungsarbeiten erforderlich, die zu entsprechenden zeitlichen Verzögerungen bei der Versuchsdurchführung führten (Abb. 4-39).



Abb. 4-39: Sedimentiertes Bohrklein in Förderleitung vor Schieber.

Ergebnis

Hinsichtlich der beim PPT-Verfahren zu erwartenden Zugkräfte und Drehmomente lieferte auch der dritte Feldversuch keine belastbaren Ergebnisse. Es wurden jedoch auch keine Ausschlusskriterien beobachtet. Bis zum Abbruch der Versuche wurden keine Störungen der mechanischen Komponenten festgestellt.

Lediglich die spezifischen Anforderungen des PPT-Schneidrades an den Antrieb, in Form eines relativ hohen Drehmoments (ca. 50 kNm) bei einer relativ kleinen Drehzahl ($< 10 \text{ min}^{-1}$) führten zu einem ungleichmäßigem Lauf. Hierdurch wurde viel Energie im flexiblen Bohrstrang zwischengespeichert, mit der Folge entsprechender Verdrillungen. Dadurch traten relativ starke Schwankungen der effektiven Drehzahl am Schneidrad auf, die mitunter sogar zu kurzzeitigen Stillständen führten.

Bedingt durch diese besonderen Belastungen des Bohrstrangs konnten besonders starke Nachverschraubungen im Bohrstrang festgestellt werden. Einige Gewindeverbinder wurden regelrecht miteinander verschweißt (so genannte Kaltverschweißung) und konnten nicht mehr mit dem Brechgerät der Bohranlage gebrochen werden. Dies traf im Wesentlichen auf die ersten drei Bohrstrangen am Bohrgerät zu, für die deshalb bei zukünftigen Versuchen der Einsatz von entsprechend dimensioniertem Gestänge aus dem Raiseboring geprüft werden sollte, da sich die dort verwendeten Gestänge zur Übertragung besonders großer Drehmomente eignen.

Beim Spülungskreislauf waren trotz der getroffenen Maßnahmen keine bedeutenden Verbesserungen zu den vorherigen Versuchen festzustellen. Die Druckverhältnisse an den relevanten Stellen (Schneidrad, Brecherraum, Ringraum, Förderleitung etc.) des Förderkreislaufs waren noch nicht so eingestellt, dass ein stabiler und effektiver Spülungskreislauf etabliert werden konnte.

4.3.4 Zusammenfassung der Versuchergebnisse

Die wesentlichen Ergebnisse der Feldversuche zur Erprobung des PPT-Verfahrens können wie folgt zusammengefasst werden:

- Die entwickelte PPT-Maschine hat nach kleineren Modifikationen am Übergangsbereich zum Bohrgestänge grundsätzlich funktioniert.

- Die axiale Verschiebbarkeit des Schneidrades war für das Lösen von Blockaden im Brecherraum hilfreich.
- Die Drehmomentkapazitäten großer HDD-Anlagen (bis ca. 130 kNm) sind für die Durchführung des PPT-Verfahrens im Durchmesserbereich bis ca. 1.000 mm vermutlich ausreichend.
- Durch die Versuche konnten hinsichtlich der Zugkraftanforderungen keine belastbaren Aussagen getroffen werden.
- Der alleinige Einsatz einer Hochdruckpumpe an der Rigsite zur Erstellung eines effektiven und geschlossenen Spülungskreislaufs reicht bei geringer Überdeckung/Gebirgsfestigkeit nicht aus, um die Fließwiderstände in der Förderleitung sowie die durch den Höhenunterschied zwischen Eintrittsgrube und Scheitelpunkt des Oberbogens bedingten Widerstände zu überwinden.
- Die Druckverhältnisse an den sensiblen Stellen des Förderkreislaufs (z.B. im Schneidradbereich) müssen detailliert analysiert und diskutiert werden.

4.3.5 Schwachstellenanalyse

Die Analyse der bisher gesammelten Erfahrungen mit dem PPT-Verfahren sowie die weitere theoretische Betrachtung der Abläufe lässt folgende beiden Schwachpunkte erkennen:

- Übergangsbereich Bohrgestänge / PPT-Maschine
- Funktion des Bohrspülungskreislaufs

Diese zwei kritischen Bereiche werden nachfolgend diskutiert. Des Weiteren werden mögliche Lösungsoptionen sowie Empfehlungen für die weitere Vorgehensweise in den jeweiligen Problembereichen vorgestellt.

Übergangsbereich Bohrgestänge / PPT-Maschine

Die Problematik im Übergangsbereich von Bohrgestänge und PPT-Maschine (Abscheren der Verbindung) wurde bereits in den vorangegangenen Abschnitten eingehend beschrieben. Für die Entstehung der beobachteten Scherkräfte sind verschiedene Ursachen denkbar.

Eine mögliche Ursache kann darin liegen, dass das sehr steife Produktrohr der Bohrlinie der Pilotbohrung nicht folgen konnte, wodurch es im beschriebenen

Übergangsbereich zu einer Überbeanspruchung kam. Eine weitere Ursache kann in der Rotationsbewegung des Schneidrades an der PPT-Maschine gesehen werden. Infolge des dabei entstehenden Drehmoments erfolgte eine Ausweichbewegung der PPT-Maschine aus der Bohrlinie der Pilotbohrung und diese führte zur beobachteten Abscherung (Abb. 4-40).

Im letztgenannten Fall ist es wahrscheinlich, dass die Ausweichbewegung in der aufgetretenen Heftigkeit nur möglich war, weil die PPT-Maschine im Eintrittsbereich (d.h. in der Baugrube) praktisch nicht geführt bzw. seitlich gelagert wurde. Demzufolge konnte sich das entstehende Drehmoment ungünstig auswirken. Für diese Annahme spricht die Tatsache, dass dieser Schaden beim folgenden Versuch nicht erneut auftrat. Allerdings war bei diesem Test sowohl der Übergangsbereich verstärkt worden als auch eine seitliche Lagerung in der Baugrube eingebracht worden (= Verhindern des Ausweichens aus der Pilotbohrlinie). Folglich kann im Nachhinein nicht eindeutig zugeordnet werden, welche Maßnahme zu welchem Effekt geführt hat.



Abb. 4-40: Bruchstelle an der PPT-Maschine.

Grundsätzlich sind drei Lösungsansätze für die beschriebene Aufgabenstellung denkbar:

- Maschinelle Verstärkungselemente vor der PPT-Maschine
- Gelenkige Verbindungselemente vor der PPT-Maschine
- Gelenkige Verbindungselemente hinter der PPT-Maschine

Maschinelle Verstärkungselemente vor der PPT-Maschine

Das maschinelle Verstärkungselement im Übergangsbereich von der PPT-Maschine zum Bohrgestänge besteht aus einem separat zu montierenden, zentrisch um die Maschinenachse angebrachten, konischen Stahlbauteil, das zusätzlich auf der Außenseite mit Verstärkungsrippen ausgestattet ist. Spüldüsen sind im Verstärkungsteil zurzeit nicht integriert, können jedoch optional vorgesehen werden (Abb. 4-41).

Bedingt durch die Form unterstützt dieses Bauteil die Zentrierung der PPT-Maschine im Pilotbohrloch und weitet darüber hinaus das Bohrloch, in Abhängigkeit vom Durchmesser des Pilotbohrmeißels, schon geringfügig auf, bevor das Schneidrad der PPT-Maschine die Ortsbrust erreicht hat.



Abb. 4-41: Montagebereich an der PPT-Maschine für das Verstärkungsstück (links) und montiertes Verstärkungsstück (rechts).

Die Verbesserungsmaßnahme wurde gegenwärtig noch nicht in einem größeren Feldversuch getestet. Nach allgemeiner Einschätzung ist im unmittelbaren Bereich des Verstärkungsstücks nicht mehr mit Versagensbrüchen zu rechnen. Inwieweit die potentielle Schwachstelle durch diese Maßnahme lediglich in Richtung Bohrstrang verlagert wurde, bedarf weiterer Untersuchungen. In jedem Fall wird der Übergangsbereich vom Verstärkungsstück zum Bohrgestänge nach einem weiteren Feldversuch sehr sorgfältig auf Risse und Deformationen zu überprüfen sein.

Gelenkige Verbindungselemente vor der PPT-Maschine

Als alternative Verbindung ist eine maschinentechnische Konstruktion denkbar, wie sie u.a. beim Einziehvorgang von Rohrleitungen während der Durchführung von HDD-Maßnahmen eingesetzt wird. Dabei handelt es sich um Koppelungsstücke, die nur axiale Kräfte, aber keine Drehmomente übertragen können.

Diese so genannten Einziehgarnituren (Pullback-Assemblies) bestehen aus den Hauptkomponenten Drehwirbel (Swivel) und Gelenkverbinder (U-Joint) oder Schäckel (Abb. 4-42).

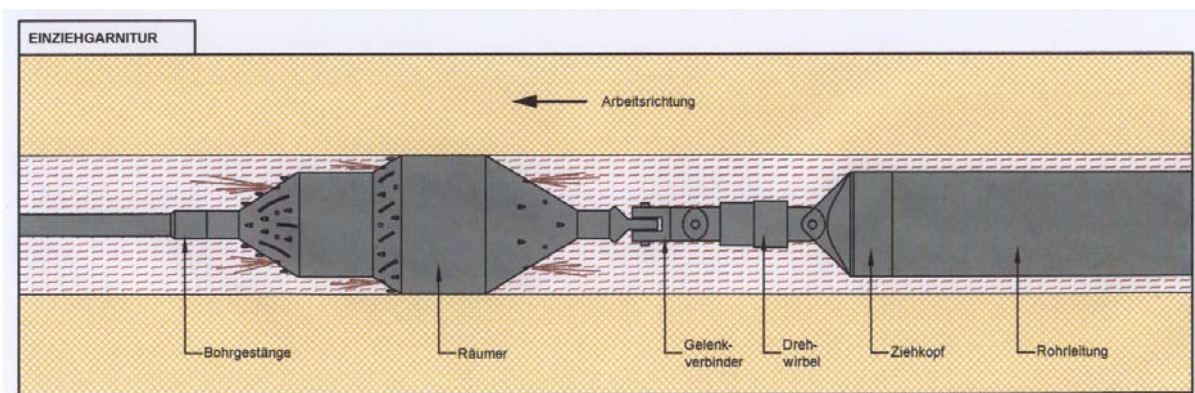


Abb. 4-42: Pullback-Assembly für HDD-Bohrungen [4-15].

Während die Drehwirbel verhindern, dass die Rotation des Bohrstrangs bzw. des Räumers auf die einzuziehende Rohrleitung übertragen wird, sorgen die Gelenkverbinder bzw. Schäckel für den Ausgleich axialer Versätze während der Montage bzw. während des Einziehvorgangs.

Gelenkverbinder sind einfach und robust aufgebaut. Hinsichtlich der alternativ einsetzbaren Schäckel ist anzumerken, dass diese bei einer Zugkraftbelastung von mehreren Tausend kN sehr groß und schwer sind und demzufolge als ungünstig im Handling auf der Baustelle einzustufen sind. Aus diesem Grund ist für den diskutierten Anwendungsfall der Einsatz eines Gelenkverbinders sinnvoll.

Vorteilhaft wirken sich bei dieser Vorgehensweise die wesentlich geringeren Scherkräfte auf das diesbezüglich empfindliche Bohrgestänge aus. Dies gilt insbesondere, wenn die starre Rohrleitung dem möglicherweise in Teilbereichen zu stark gekrümmten Pilotbohrloch (Stichwort: Dog Leg) nicht folgen kann.

Als nachteilig ist die Empfindlichkeit des Drehwirbels (Abb. 4-43) anzusehen. Zudem kann in einer solchen Konstellation keine Bohrspülung durch den Bohrstrang direkt zur PPT-Maschine verpumpt werden. Ebenfalls nachteilig wirkt sich in einer solchen Anordnung aus, dass das Schneidrad nur durch zusätzliche Antriebsmotoren in der PPT-Maschine selbst in Rotation versetzt werden kann, da der Bohrstrang keine Drehmomente an das Schneidrad übertragen kann.

Ein Drehwirbel ließe sich eventuell vermeiden, wenn der Bohrstrang während des Einziehvorgangs nicht rotierte. Erfahrungsgemäß entstehen bei diesem Vorgang dennoch Torsionen im Bohrstrang (z.B. aus der Bohrlochkrümmung bzw. Haltemomente für die vom Schneidrad erzeugten Drehmomente), was zu einer starken Drehmomentbelastungen des Gelenkverbinders führen kann.

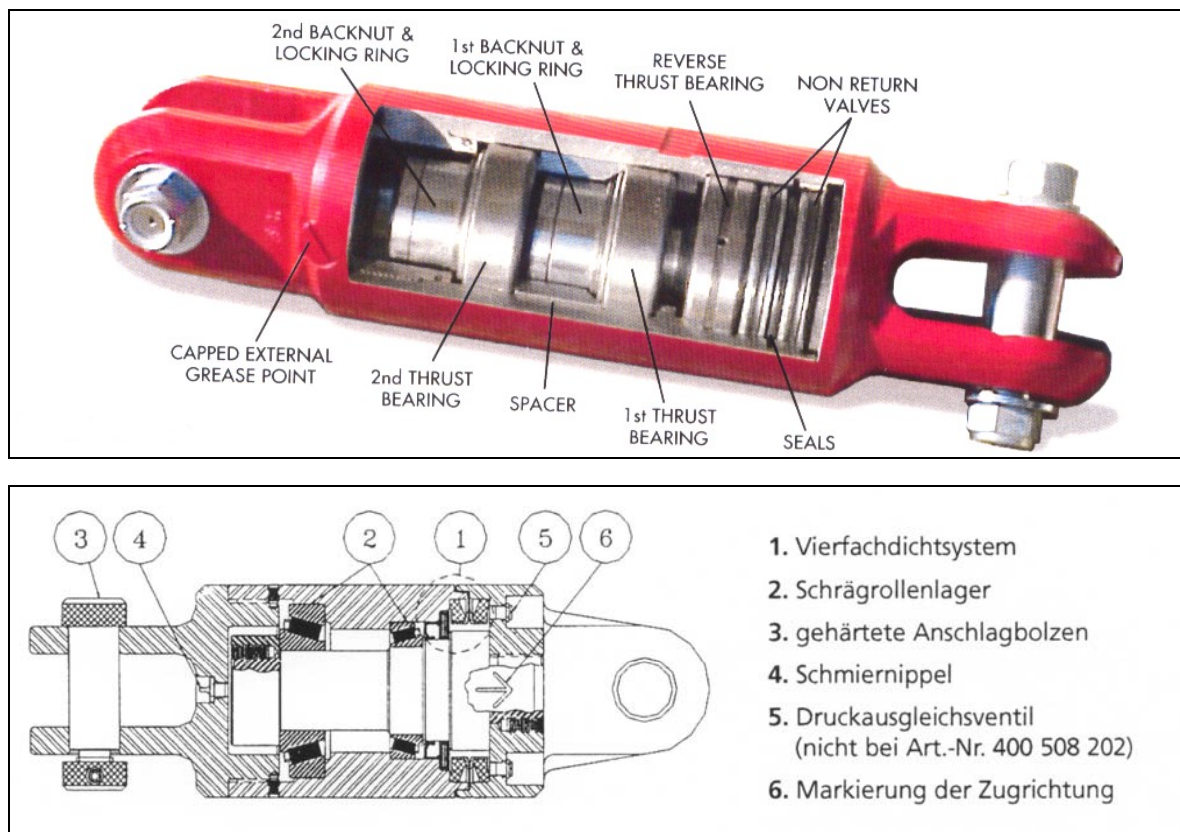


Abb. 4-43: Details eines Drehwirbels [4-41, 4-42].

Für Drehwirbel der erforderlichen Dimension gilt ebenfalls der Hinweis, dass diese Bauteile groß und von hohem Gewicht sind (Abb. 4-44). Demzufolge kann eine Überprüfung bzw. Anpassung des Durchmessers der Pilotbohrung erforderlich werden. Ein Grund für die Baugröße ist der übliche Sicherheitsfaktor von 5 (Bruchlast / zulässige Zugkraft).

Standard Sizes and Specifications		
Part Number	Capacity (Tons) Max Pull Force	Diameter MM
15 Ton	15	96
30 Ton	30	127
40 Ton	40	144
55 Ton	55	160
100 Ton	100	225
200 Ton	200	343
300 Ton	300	430
400 Ton	400	490

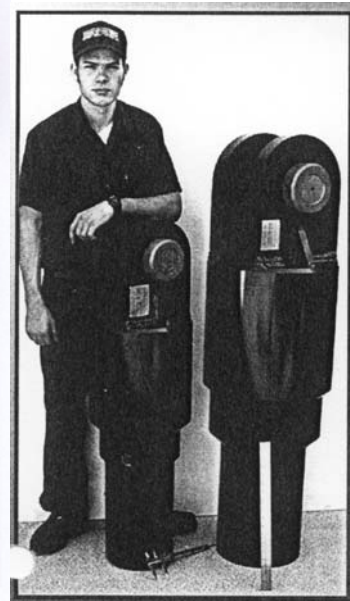


Abb. 4-44: Durchmesserangaben und Abmessungen unterschiedlicher Drehwirbel [4-43].

Gelenkige Verbindungselemente hinter der PPT-Maschine

Eine weitere Möglichkeit, die Scherkräfte auf die PPT-Maschine bzw. auf deren Hauptwelle während des Einziehvorgangs zu reduzieren, ist die Anordnung einer gelenkigen Verbindung zum Produktrohrstrang unmittelbar hinter der PPT-Maschine (Abb. 4-45).

Die Baulänge der PPT-Maschine soll konstruktiv möglichst kurz gehalten (z.B. 1,50 bis 2,00 m) und der Außenmantel der PPT-Maschine gelenkig mit einem Nachläufer verbunden werden. Dieser Nachläufer würde etwa die gleichen Dimensionen (Länge, Durchmesser) und Festigkeiten (Zugbelastung) aufweisen, wie die PPT-Maschine. Die Verbindung der beiden Rohrstücke (PPT-Maschine und Nachläufer) kann z.B. über drei oder mehr schwimmend gelagerte Hydraulikzylinder erfolgen.

Eine ähnliche Maschinenkonfiguration wird in der MT-Technik für die Steuerung der MT-Maschine angewendet. In diesem Fall können die drei Hydraulikzylinder separat angesteuert werden und damit die MT-Maschine in eine bestimmte Richtung auslenken. Im hier vorgesehenen Anwendungsfall können die der PPT-Maschine durch das Bohrloch aufgezwungenen Richtungsänderungen zumindest teilweise von den Hydraulikzylindern kompensiert werden.

Um die Flexibilität des ersten Rohrabchnitts weiter zu erhöhen, wäre es denkbar, einen zweiten Nachläufer vorzusehen, der über die gleiche Konstruktion mit dem

ersten Nachläufer verbunden wird und selbst über weitere (drei) Hydraulikzylinder mit dem nachfolgenden Produktrohr verbunden wird.

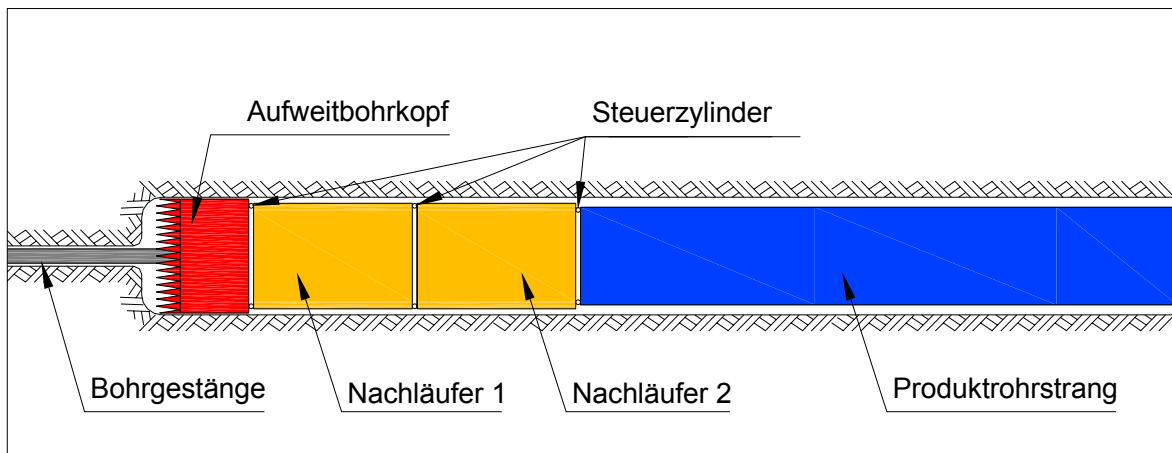


Abb. 4-45: Mögliche Anordnung von Gelenkverbindern (Steuerzylinder) hinter der PPT-Maschine.

Wird in diesen Gelenkverbindungen z.B. eine axiale Abwinkelung von einem Grad zugelassen, so kann der erste Rohrabschnitt einem Bohrlochradius von ca. 250 m folgen. Dieser Wert läge weit unterhalb der angestrebten Minimalradien von ca. 800 bis 1.200 m (Abb. 4-46).

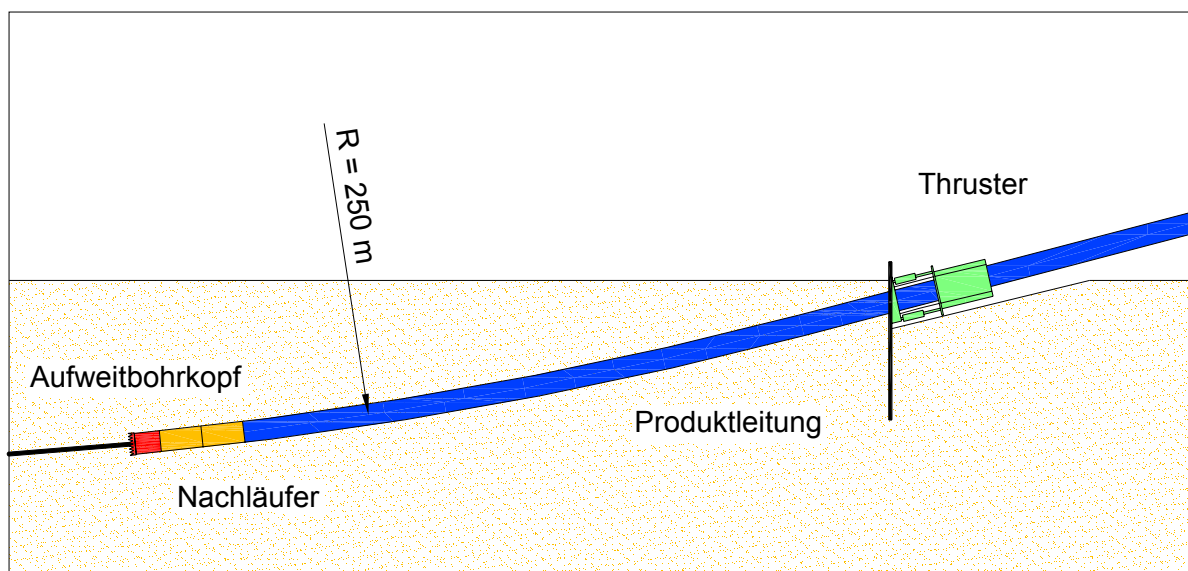


Abb. 4-46: Realisierbare Kurvengängigkeit mittels Gelenkverbindern hinter der PPT-Maschine.

Von den vorgestellten Lösungsmöglichkeiten erscheint der Einbau von Gelenkverbindern hinter der PPT-Maschine das größte Verbesserungspotential aufzuweisen. Hierdurch wird die gewünschte Flexibilität im ersten Produktrohrabschnitt

erreicht. Gleichzeitig kann das Bohrgestänge neben der Zugkraftübertragung auch für die Übertragung des Drehmoments zum Schneidrad sowie für die Zuleitung der Bohrspülung genutzt werden.

Auch wenn nicht ausreichend Versuchsergebnisse vorliegen, um diesen Sachverhalt abschließend beurteilen zu können, so hat sich schon bei den kurzen Bohrungen während der Feldversuche gezeigt, dass sich die Kombination aus hohem Drehmomentbedarf am Schneidrad bei gleichzeitiger geringer Drehzahl des Schneidrads ungünstig auf den gesamten Prozess auswirkt. Dies liegt darin begründet, dass der Bohrstrang praktisch als Federspeicher wirkt und dadurch zu einem sehr unrunder Lauf des Schneidrads und zu hohen Belastungen der Schneidwerkzeuge und des Bohrgestänges beigetragen hat.

Es erscheint deshalb sinnvoll, bei der Umsetzung der Empfehlung für den Bohrstrang weitere Entlastungsoptionen zu untersuchen. Eine dieser Möglichkeiten ist die Integration eines Untersetzungsgetriebes in die PPT-Maschine, durch das die Drehzahl des Bohrstrangs von beispielsweise 60 U/min auf 6 U/min reduziert werden kann. Hierdurch kann gleichzeitig eine Reduktion des durch den Bohrstrang zu übertragenden Drehmoments um 90% herbeigeführt werden (bei gleichem Drehmomentbedarf am Schneidrad).

Weiterhin soll in einem zukünftigen Untersuchungsstadium die Möglichkeit erforscht werden, ein Linksdrehen des Schneidrads (ohne Zugbelastung) über ein Wendegetriebe in der PPT-Maschine zu ermöglichen. Dies kann bei einer Blockade des Schneidrads eventuell durch ein axiales Zurückschieben des Bohrstrangs um einen geringen Betrag (z.B. 15 cm) in Richtung Produktrohr realisiert werden, durch das das Antriebsritzel am Bohrstrang aus dem Untersetzungsgetriebe in das Wendegetriebe geschoben wird. Als Folge ließe sich das Schneidrad, bei weiterhin im Uhrzeigersinn rotierendem Bohrstrang, im Stand links herum bewegen, wodurch die meisten Blockaden am Schneidrad behoben werden können.

Zur Optimierung des Schwachstellenbereichs Bohrgestänge / PPT-Maschine wird zusammenfassend die Kombination folgender maschinentechnischer und verfahrenstechnischer Maßnahmen empfohlen:

1. Einbau von mindestens einem gelenkigen Verbindungsstück zwischen PPT-Maschine und Produktrohr (besser: zwei oder drei Nachläufer).

2. Wenn möglich, Integration eines Untersetzungsgetriebes in die PPT-Maschine ($i \approx 5:1$).
3. Wenn möglich, Integration eines Wendegetriebes in die PTT-Maschine, mit dessen Hilfe über den Bohrstrang ein Linksdrehen des Schneidrads in Notfällen (Blockade) ermöglicht wird.

Funktion des Bohrspülungskreislaufs

Während der Durchführung der Feldversuche hat sich gezeigt, dass in der vorgesehenen Weise kein geschlossener Bohrspülungskreislauf etabliert werden kann. Auch wenn die Versuche in ihrem Umfang nicht zufrieden stellend waren, so wurde doch im Hinblick auf den Bohrspülungskreislauf zumindest der sehr kritische Anfahrzustand des Verlegevorgangs abgebildet, bei dem die PPT-Maschine mit dem verbundenen Rohr in den Baugrund eingezogen wird.

Aufgrund der minimalen Überdeckung zu diesem Zeitpunkt und der damit einhergehenden Steigerung der Wahrscheinlichkeit von Bohrspülungsausbrüchen (Ausbläser, Abb. 4-47) ist der Anfahrzustand von besonderer Bedeutung für den Spülungskreislauf.



Abb. 4-47: Ausbläser über einer Bohrtrasse.

Bevor auf mögliche Lösungsansätze eingegangen wird, soll für ein besseres Verständnis zunächst der ursprünglich vorgesehene und in den Feldversuchen im Wesentlichen so umgesetzte Bohrspülungskreislauf beschrieben werden.

Vorgesehener Spülungskreislauf

Auf der Bohranlagenseite (Rigsite) wird zunächst die aus Wasser und Bentonit bestehende Bohrspülung in dafür vorgesehenen Mischeinrichtungen hergestellt. Die Bohrspülung wird über Ladepumpen zur Hochdruckpumpe gefördert, von wo sie unter hohem Druck durch die übertägigen Zuleitungen zum Bohrgerät und von dort durch den Bohrstrang zur PPT-Maschine gepumpt wird (Abb. 4-48, Bereich 1).

An der PPT-Maschine teilt sich der Spülungsstrom auf. Ein Teil fließt geradlinig durch die PPT-Maschine hindurch (Abb. 4-48, Bereich 5) und tritt am hinteren Ende der PPT-Maschine direkt in die Förderleitung ein.

Der andere Teil des Spülungsstroms wird im Bereich des Brecherraums durch seitliche Bohrungen (Abb. 4-48, Bereich 2) von der hohlen Hauptwelle der PPT-Maschine in den Brecherraum geleitet, wo er sich mit dem vom Schneidrad gelösten Boden vermischt (Abb. 4-48, Bereich 3).

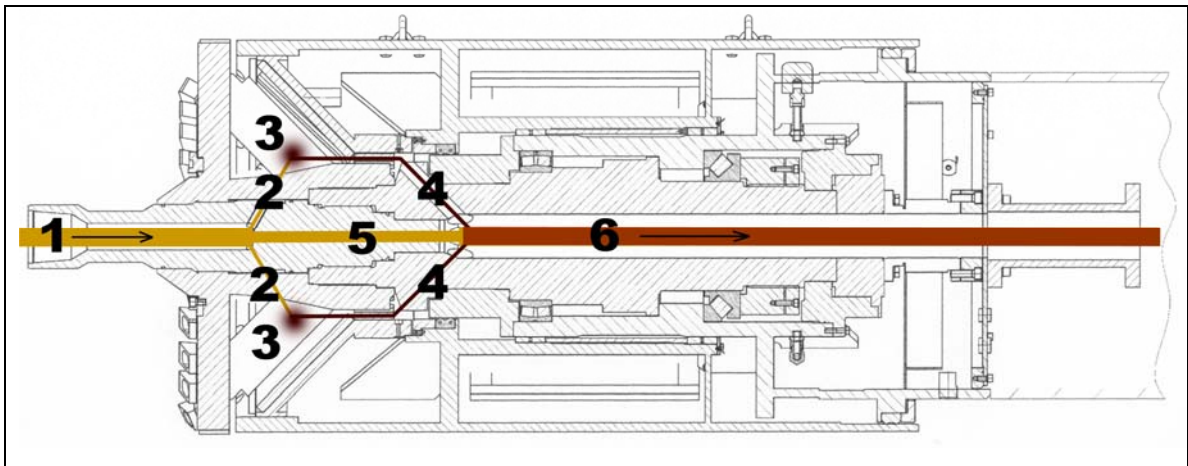


Abb. 4-48: Vorgesehene Fließwege der Bohrspülung durch die PPT-Maschine.

Bereich 1 = Frische Bohrspülung; Bereich 2 = Teilstrom der frischen Bohrspülung zum Brecherraum; Bereich 3 = Brecherraum, in dem die frische Bohrspülung Bohrklein aufnimmt; Bereich 4 = Fließweg der mit Bohrklein beladenen Bohrspülung vom Brecherraum zur Förderleitung; Bereich 5 = Teilstrom der frischen Bohrspülung zur Förderleitung; Bereich 6 = Förderstrom.

Die mit Bohrklein beladene Suspension wird anschließend durch Bohrungen, die vom Ende des Brecherraums zur Hauptwelle der PPT-Maschine führen (Abb. 4-48, Bereich 4), wieder dem Hauptstrom der (frischen) Bohrspülung zugeführt (Abb. 4-48, Bereich 6).

Tatsächlicher Spülungsweg

In den Feldversuchen konnte jedoch ein anderer Weg der Bohrspülung festgestellt werden. Die frische Bohrspülung erreichte die PPT-Maschine wie geplant durch das Bohrgestänge (Abb. 4-49, Bereich 1). Dort trat jedoch offenbar der gesamte Spülungsstrom durch die Bohrungen (Abb. 4-49, Bereich 2) in den Brecherraum (Abb. 4-49, Bereich 3). Hier vermischte sich der Spülungsstrom mit dem vom Schneidrad der PPT-Maschine gelösten Bohrklein.

Die mit Bohrklein beladene Bohrspülung floss im Anschluss nicht durch die Bohrungen in der PPT-Maschine zum Förderrohr, sondern presste sich zurück durch das Schneidrad zur Ortsbrust (Abb. 4-49, Bereich 4) und von dort direkt an die Geländeoberfläche (Abb. 4-49, Bereich 5).

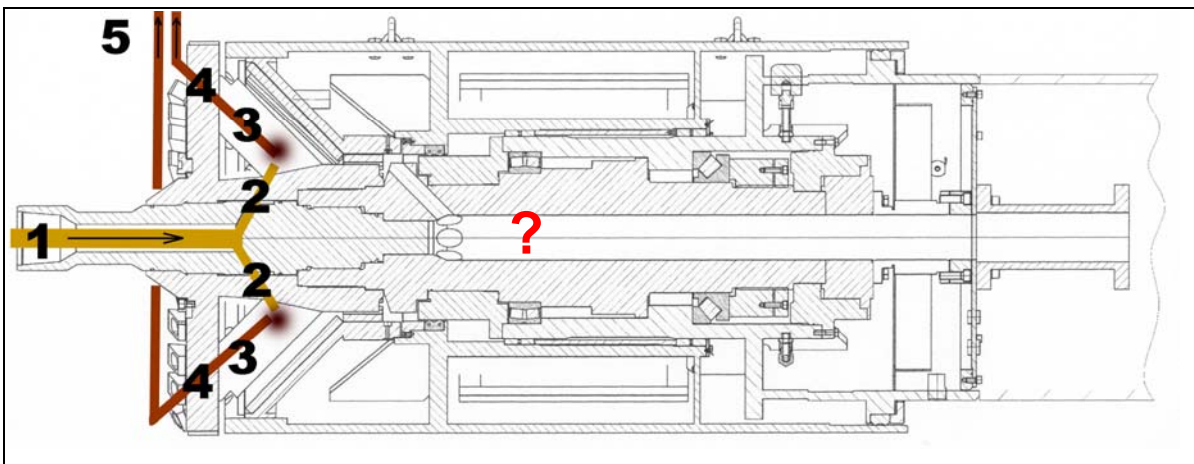


Abb. 4-49: Tatsächliche Fließwege der Bohrspülung durch die PPT-Maschine.

Bereich 1 = Frische Bohrspülung; Bereich 2 = Teilstrom der frischen Bohrspülung zum Brecherraum; Bereich 3 = Brecherraum, in dem die frische Bohrspülung Bohrklein aufnimmt; Bereich 4 = Fließweg der mit Bohrklein beladenen Bohrspülung vom Brecherraum zurück durch das Schneidrad an die Ortsbrust; Bereich 5 = mit Bohrklein beladene Bohrspülung fließt von der Ortsbrust zur Geländeoberfläche.

An der Geländeoberfläche konnten dann Ausbläser, d.h. der unkontrollierte Austritt von Bohrspülung an der Geländeoberfläche, beobachtet werden. Der

Spülungskreislauf war somit unterbrochen. Durch die Förderleitung wurde keine Flüssigkeit (weder mit Bohrklein beladene Spülung noch frische Bohrspülung) transportiert.

Der Fließwiderstand durch die Förderleitung im Produktrohr zur Baugrube war offenbar größer, als durch Bohrungen, Brecherraum und Deckschichten zur Geländeoberfläche. Diese Beobachtung gilt nicht nur für den mit Bohrklein beladenen, relativ viskosen Spülungsstrom, sondern auch für den frischen Bohrspülungsstrom, der theoretisch ungehindert durch die PPT-Maschine ins Förderrohr hätte eintreten können.

Dies ist möglicherweise in einem gewissen Umfang geschehen, allerdings konnten am Ende des Förderrohrs übertage keine konstanten und mengenmäßig nennenswerten Flüssigkeitsaustritte beobachtet werden. Lediglich beim versuchsweisen Einsatz eines Saugwagens konnten geringe Mengen Bohrspülung mit Bohrklein durch die Förderleitung bewegt werden. Es stellte sich jedoch zu keinem Zeitpunkt eine ausreichende und gleichmäßige Förderung ein.

Grenzdruck und Überdeckung

An dieser Stelle ist es sinnvoll, den Begriff des Grenzdrucks einzuführen. Dabei soll es sich im hier behandelten Zusammenhang um denjenigen Druck der Bohrflüssigkeit an der Ortsbrust (bzw. im Brecherraum) handeln, ab dem der Boden oberhalb der PPT-Maschine von der Bohrspülung durchflossen wird und es damit zu den bereits beschriebenen Ausbläsern (Austritten von Bohrspülung an der Oberfläche) kommen kann.

Dieser Grenzdruck ist in erster Linie abhängig vom spezifischen Bodenaufbau im Bohrungsbereich sowie von der effektiven Überdeckung der PPT-Maschine mit Baugrund.

Hinsichtlich der physikalischen Eigenschaften des Baugrunds sind neben der Permeabilität des Bodens weitere Faktoren wie z.B. die innere Reibung, die Klüftigkeit oder der Grundwasserstand von großer Bedeutung. Diese Parameter können lokal sehr stark schwanken, beispielsweise, wenn der Boden im Trassenbereich sehr heterogen aufgebaut ist.

Demgegenüber ist die Überdeckung ein mit der Planung bzw. mit der Erstellung der Pilotbohrung klar definierter Wert. Dieser beträgt beim typischen, bananen-

förmigen Bohrprofil theoretisch null Meter am Ein- bzw. Austrittspunkt und in Abhängigkeit des Bohrprofils etwa 10 bis 30 m im mittleren Teil der Bohrung.

Für die weitere Betrachtung der Problematik müssen zunächst Soll-Werte definiert werden, die bei der Diskussion der Lösungsmöglichkeiten einen Rahmen vorgeben. Dies ist für die geometrischen Aspekte relativ einfach, da die minimale Überdeckung im Ein- bzw. Austrittsbereich aus rein praktischen Gründen wohl niemals unter einem Meter liegen wird, da auf beiden Seiten der Bohrung entsprechende Baugruben erforderlich sind, um die Bohrspülung während der Pilotbohrung bzw. während des Testens der PPT-Maschine vor Bohrungsbeginn aufzufangen.

Hinsichtlich der maximalen Deckung kann kein Fixwert definiert werden, da dieser Aspekt von projektspezifischen Gegebenheiten wie z.B. der Tiefe des zu unterquerenden Gewässers oder der zu kreuzenden Fremdleitungen und dem dabei einzuhaltenden Mindestabstand etc. beeinflusst wird. Aus diesem Grund muss an dieser Stelle eine Vorgabe anhand von Erfahrungswerten aus dem HDD und MT gewählt werden. Der diesbezügliche Soll-Wert wird für die weitere Bearbeitung auf 25 m festgelegt.

Wesentlich schwieriger ist die Festlegung der Baugrundparameter bzw. des Grenzdrucks. Hier muss ebenfalls ein realistischer, sowohl auf praktischen Erfahrungen als auch auf theoretischen Überlegungen basierender Wert gefunden werden, der die Rahmenbedingungen mit hinreichender Genauigkeit und Allgemeingültigkeit abbildet. Dieser Wert wird hier für die weitere Betrachtung durch den spezifischen Grenzdruck (= spezifischer Widerstand des Bodens gegen Schaffung eines Fließweges für die Bohrspülung) von 0,2 bar je Meter Baugrund definiert.

Dies bedeutet, dass der Druck an der Ortsbrust bei einer Verlegetiefe von beispielsweise zehn Metern maximal auf zwei Bar ansteigen darf (= zweifacher Wert des Wasserdrucks bei kompletter Sättigung des Baugrunds mit Grundwasser).

Die gewählte Größenordnung für den Grenzdruck umfasst erfahrungsgemäß eine große Sicherheit, da konkrete Berechnungen historischer Projekte unter realistischen Baugrundbedingungen (Sand, Schluff) Werte von $>0,3$ bar je Meter Baugrund ergeben haben.

Auswahl repräsentativer Bauzustände

Den kritischen Teil des Spülungskreislaufs stellt derjenige des Förderteils und nicht derjenige des Speise- oder Zuleitungsteils dar. Es ist völlig unproblematisch, ein ausreichendes Volumen an frischer Bohrspülung (d.h. Spülung ohne Bohrklein) zu den vorgesehenen Austrittsöffnungen an der PPT-Maschine zu pumpen. Dabei spielt auch der erforderliche Druck an den Düsen für die weitere Betrachtung nur eine untergeordnete Rolle, da alle hierzu erforderlichen maschinellen Bauteile wie Hochdruckpumpen, Zuleitungen etc. bereits in der Industrie verfügbar sind. Die genannten Parameter beeinflussen letztendlich nur die Größe der installierten Pumpenleistung. Diese kann z.B. bei einem Volumenstrom von 2.500 Liter/min und einer erforderlichen Druckhöhe von 50 bar durchaus 300 kW und mehr erforderlich machen [4-9].

Hierbei ist es unerheblich, ob die frische Bohrspülung durch das Bohrgestänge von der Rigsite zur PPT-Maschine gepumpt wird oder alternativ von der Pipesite durch das Produktrohr. Die Zuleitungslänge ist im ungünstigsten Fall, d.h. zu Beginn der Verlegung, identisch, da der Produktrohrstrang und das Bohrgestänge in diesem Moment die gleiche Länge aufweisen.

Bei der Zuleitung durch das Bohrgestänge würde sich die Zuleitungslänge mit fortschreitendem Einzug der PPT-Maschine zwar verkürzen, dies hätte jedoch nur einen positiven Einfluss auf die erforderliche Leistung an der Hochdruckpumpe. Hinsichtlich der Förderung der mit Bohrklein vermischten Spülung wäre diese Entwicklung jedoch ohne Belang.

Aus den genannten Gründen kann die weitere Betrachtung auf die Wechselwirkung des spezifischen Flüssigkeitsdrucks zwischen Förderleitung und Ortsbrust beschränkt werden. Durch die Analyse zweier beispielhafter Bauzustände kann die Wechselwirkung für die gesamte Bauphase abgeschätzt werden.

Beispielhafte Bauzustände

Die PPT-Maschine befindet sich beim ersten ausgewählten Bauzustand am Beginn des Bohrprofils (Abb. 4-50). Die wesentlichen Rahmenbedingungen können beispielhaft wie folgt definiert werden:

L_1	=	Länge der Förderleitung	=	1.000 m
H_1	=	Überdeckung der PPT-Maschine	=	1,0 m

H_2	=	Maximale Höhe der Förderleitung im Oberbogen	=	2,5 m
H_3	=	Höhe der Förderleitung am Ende des Produktrohrs	=	1,0 m

Im Bauzustand 1 ist die Überdeckung der PPT-Maschine und damit der zulässige Druck an der Ortsbrust minimal.

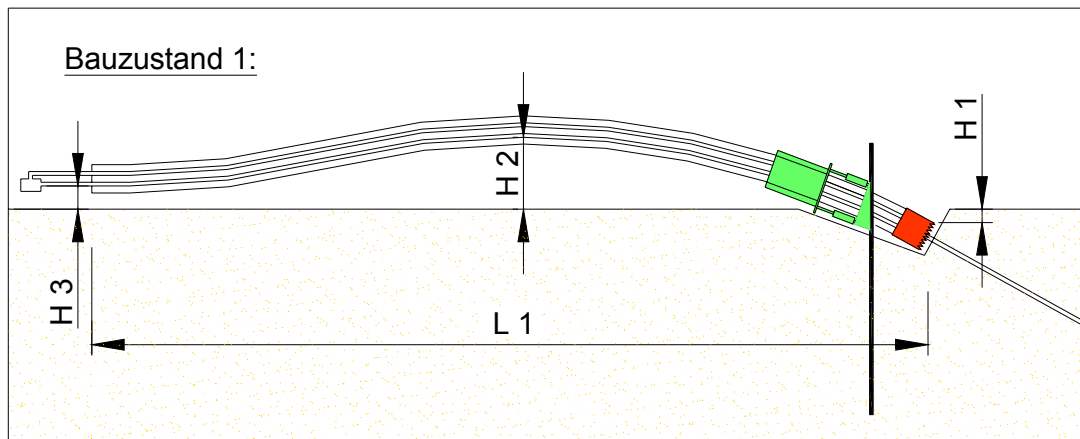


Abb. 4-50: Prinzipielle Darstellung des Bauzustands 1.

Die PPT-Maschine befindet sich beim zweiten ausgewählten Bauzustand am tiefsten Punkt des Bohrprofils (Abb. 4-51). Die wesentlichen Rahmenbedingungen können hier wie folgt definiert werden:

L_1	=	Länge der Förderleitung	=	1.000 m
H_1	=	Überdeckung der PPT-Maschine	=	25,0 m
H_2	=	Maximale Höhe der Förderleitung im Oberbogen	=	2,5 m

Im Bauzustand 2 sind die erforderliche Förderhöhe und damit der Fließwiderstand in der Förderleitung maximal.

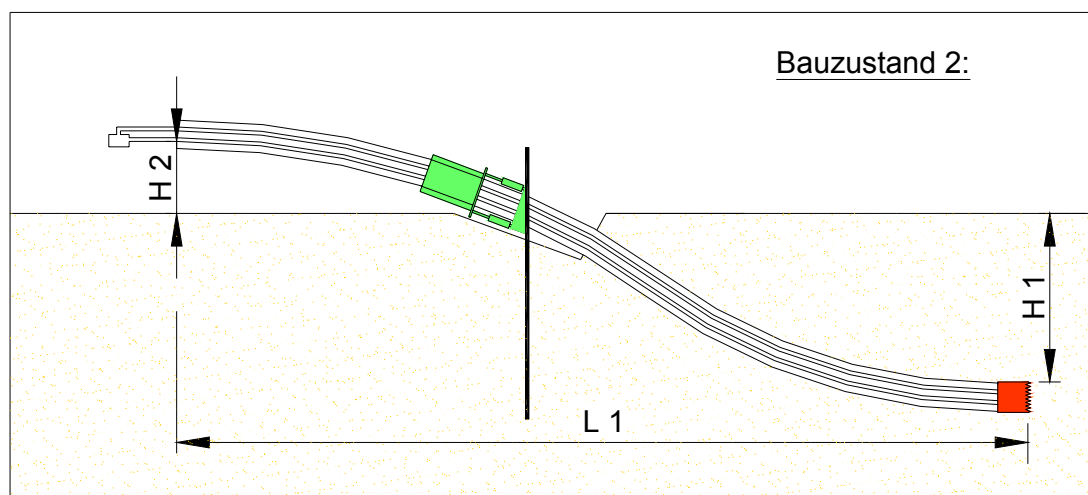


Abb. 4-51: Prinzipielle Darstellung des Bauzustands 2.

Für beide Bauzustände wird angenommen, dass der Grundwasserstand etwa 1 m unterhalb der Geländeoberfläche liegt.

Maximal zulässiger Druck im offenen Bohrloch (Grenzdruck)

Im idealisierten Bauzustand 1 tritt die PPT-Maschine gerade in den Baugrund ein und hat dabei eine minimale Deckung von 1,0 m (Annahme). In der Realität wird zu diesem Zeitpunkt der maximal zulässige Druck im offenen Bohrloch wahrscheinlich nicht durch die Deckung bestimmt, sondern aufgrund der kurzen Fließwege in die Baugrube durch den dort herrschenden hydraulischen Druck begrenzt. Dieser beträgt bei einer Spüldichte von ca. 1,20 kg/l und einer komplett gefüllten Baugrube (d.h. einer Flüssigkeitshöhe über der PPT-Maschine von 1,0 m) ca. 0,12 bar. Die angenommene Cuttingbelastung der Spülung liegt bei ca. zehn bis zwölf Vol-%, die Dichte der Cuttings bei ca. 2,3 kg/l, die Dichte der Bentonit-Suspension bei ca. 1,07 kg/l [4-44].

Wegen des geringen Überschnitts an der PPT-Maschine (Schneidraddurchmesser/Produktrohrdurchmesser) wird dieser Fließweg jedoch relativ schnell mit dem Bohrfortschritt an Widerstand gewinnen und kann dann durch den oben beschriebenen Grenzdruck ersetzt werden.

Die Anfahrssituation muss in der späteren Praxisanwendung entsprechend berücksichtigt werden. Dies kann beispielsweise durch eine ausreichende Größe der Baugrube erreicht werden, damit die anfänglich durch den Ringraum zurückfließende Bohrspülung aufgenommen werden kann. Alternativ kann auch eine so genannte Anfahrddichtung in der Baugrube vorgesehen werden.

Für den Bauzustand 2 kann der zulässige Maximaldruck im offenen Bohrloch mit den oben getroffenen Annahmen entsprechend auf ca. 5,0 bar dimensioniert werden (Überdeckung = 25 m, Grenzdruck-Gradient = 0,2 bar/m).

Erforderlicher Förderdruck am Beginn der Förderleitung

Zur Förderung der mit Bohrklein beladenen Bohrspülung aus dem Brecherraum der PPT-Maschine durch die PPT-Maschine hindurch und weiter durch die Förderleitung bis zum Ende des Produktrohres ist ein bestimmter Förderdruck erforderlich. Dieser setzt sich aus einem statischen und einem dynamischen Teil zusammen.

Statischer Anteil des erforderlichen Förderdrucks

Der statische Anteil wird im Wesentlichen durch die Höhendifferenz zwischen PPT-Maschine und höchstem Punkt der Förderleitung bestimmt. Aufgrund der charakteristischen Form des Oberbogens des Produktrohrs (Katzenbuckel) wird die erforderliche Druckhöhe nach dem Anfahren des Förderkreislaufts geringer, da nur noch der Höhenunterschied zwischen PPT-Maschine und Ende der Förderleitung zu überwinden ist. Dieser ist im gewählten Beispiel 1,5 m niedriger als der höchste Punkt im Oberbogen. Für die Anfahrssituation, d.h. bis der Spülungskreislauf geschlossen ist, muss jedoch ein anfänglich höherer Druck überwunden werden (s.o.). Dieser wird nachfolgend betrachtet.

F-4/6	$p_{FL,st}$	=	$\rho_{Sp} * g * H_x / 10^5$	[bar]
--------------	-------------	---	------------------------------	-------

mit:

$p_{FL,st}$	=	statischer Druck in der Förderleitung	[bar]
ρ_{Sp}	=	Dichte der Spülung (= 1.220)	[kg/m³]
g	=	Erdbeschleunigung (= 9,81)	[m/s²]
H_x	=	Maximaler Höheunterschied in der Förderleitung	[m]

Die resultierenden statischen Drücke betragen gemäß Formel F-4/6 für die ausgewählten Beispiele somit ca. 0,42 bar im Bauzustand 1 und ca. 3,29 bar im Bauzustand 2. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass im Grundwasser bereits ein entsprechender Vordruck im Brecherraum bei Bauzustand 2 anliegt. Dieser beläuft sich bei einer Dichte des Grundwassers von 1 kg/L und 24 m Überdeckung auf 2,4 bar.

Somit beträgt der relevante statische Druck im Bauzustand 1 etwa 0,42 bar und im Bauzustand 2 etwa 0,89 bar.

Dynamischer Anteil des erforderlichen Förderdrucks

Der dynamische Anteil des erforderlichen Förderdrucks setzt sich im Wesentlichen aus zwei Komponenten zusammen, dem erforderlichen Druck $p_{FL,dyn1}$ zur Überwindung der Strömungshindernisse in der PPT-Maschine selbst (Verengungen, Richtungsänderungen etc.) sowie demjenigen Druck $p_{FL,dyn2}$ zur Überwindung der Fließwiderstände in der Förderleitung (F-4/7).

F-4/7	$p_{FL,dyn}$	=	$p_{FL,dyn1} + p_{FL,dyn2}$	[bar]
--------------	--------------	---	-----------------------------	-------

mit:

$p_{FL,dyn}$ = dynamischer Druck [bar]

$p_{FL,dyn1}$ = dynamischer Druck 1 in der PPT-Maschine [bar]

$p_{FL,dyn2}$ = dynamischer Druck 2 in der Förderleitung [bar]

Der erstgenannte dynamische Druckverlust in der PPT-Maschine kann aufgrund der Komplexität der Konstruktion nur über Erfahrungswerte abgeschätzt und für die folgende Betrachtung mit 1 bar für die unterstellten Rahmenbedingungen (Volumenstrom = 2.000 L/min) angenommen werden.

Zur Bestimmung des erforderlichen dynamischen Drucks in der Förderleitung wird angenommen, dass es sich bei der durch die Förderleitung strömenden Bohrspülung um eine pseudo-plastische Flüssigkeit handelt [4-45], wobei sich das Strömungsprofil im Beispiel im Grenzbereich zwischen laminarer und turbulenter Strömung bewegt (da die tatsächliche Strömungsgeschwindigkeit etwa der kritischen Strömungsgeschwindigkeit entspricht).

Für die plastische Viskosität der mit Cuttings beladenen Flüssigkeit wird ein Wert von 40 cP zu Grunde gelegt. Als relevante Pumprate werden 2.000 L/min angenommen, während der Durchmesser für die Förderleitung mit 200 mm festgelegt wird.

Da der dynamische Druck in der Förderleitung für beide untersuchten Bauzustände identisch ist, kann der entsprechende Wert einheitlich mit Formel F-4/8 bestimmt werden [4-9]. Die zugehörige Fließgeschwindigkeit in der Förderleitung berechnet sich nach Formel F-4/9.

F-4/8	$p_{FL,dyn2}$	=	$L * Q^{1,8} * \mu_{plast}^{0,2} * \rho_{st}^{0,8} / (901,63 * D^{4,8} * 100)$	[bar]
--------------	---------------	---	--	-------

mit:

$p_{FL,dyn2}$ = dynamischer Druck in Förderleitung [bar]

L = Länge der Förderleitung [m]

Q = Pumprate [L/min]

μ_{plast} = plastische Viskosität [cP]

ρ_{Sp} = Dichte der Spülung [kg/l]

D = Innendurchmesser der Förderleitung [in]

F-4/9	v	=	Q / A	[m/s]
--------------	----------	----------	--------------	--------------

mit:

v	=	Strömungsgeschwindigkeit in Förderleitung	[m/s]
Q	=	Pumprate	[m³/s]
A	=	Querschnittsfläche der Förderleitung	[m²]

Der resultierende Wert für den Druckverlust in der Förderleitung beträgt 1,19 bar. Die zugehörige Fließgeschwindigkeit berechnet sich bei einem Durchmesser der Förderleitung von 200 mm mit Formel F-4/9 zu ca. 1,06 m/s.

Der summierte dynamische Druck berechnet sich damit nach Formel F-4/7 zu 2,19 bar (1,00 bar + 1,19 bar).

Summe aus statischem und dynamischem Anteil des erforderlichen Förderdrucks

Der erforderliche Gesamtdruck in der Förderleitung zur Überwindung der statischen und dynamischen Widerstände beläuft sich somit auf folgende Werte:

Bauzustand 1: 0,42 bar (statisch) + 2,19 bar (dynamisch) = **2,61 bar**

Bauzustand 2: 0,89 bar (statisch) + 2,19 bar (dynamisch) = **3,08 bar**

Die graphische Auswertung dieser Druckverhältnisse (Abb. 4-52) zeigt, dass praktisch zu keinem Moment im Anfahrbereich einer Bohrung nach dem PPT-Verfahren der Grenzdruck so hoch ist, dass ein Förderkreislauf allein über die Hochdruckpumpe an der Rigsite aufgebaut werden kann. Der Grenzdruck ist immer niedriger als der erforderliche Förderdruck. Allerdings nähern sich die beiden Werte mit zunehmender Verlegetiefe an.

Auf die Verhältnisse der Feldversuche übertragen (Förderleitung DN150, Grundwasserstand 2 m unter Gelände, $H_2 = 1,0$ m, Volumenstrom = 1.500 L/min), kann damit abgeleitet werden, warum es zu den beobachteten Break-outs gekommen ist und dass die Initiierung eines Spülungskreislaufs alleine mit der Hochdruckpumpe an der Rigsite zum Scheitern verurteilt war (Abb. 4-53).

In Abb. 4-53 ist zu erkennen, dass der erforderliche Förderdruck unter den gegebenen Verhältnissen (insbesondere Grundwasserstand) über den gesamten Verlegevorgang nahezu konstant bleibt. Ab einer Verlegetiefe von etwa 15 m stellen sich Bedingungen ein, bei denen eine Förderung wie ursprünglich geplant, anlaufen könnte.

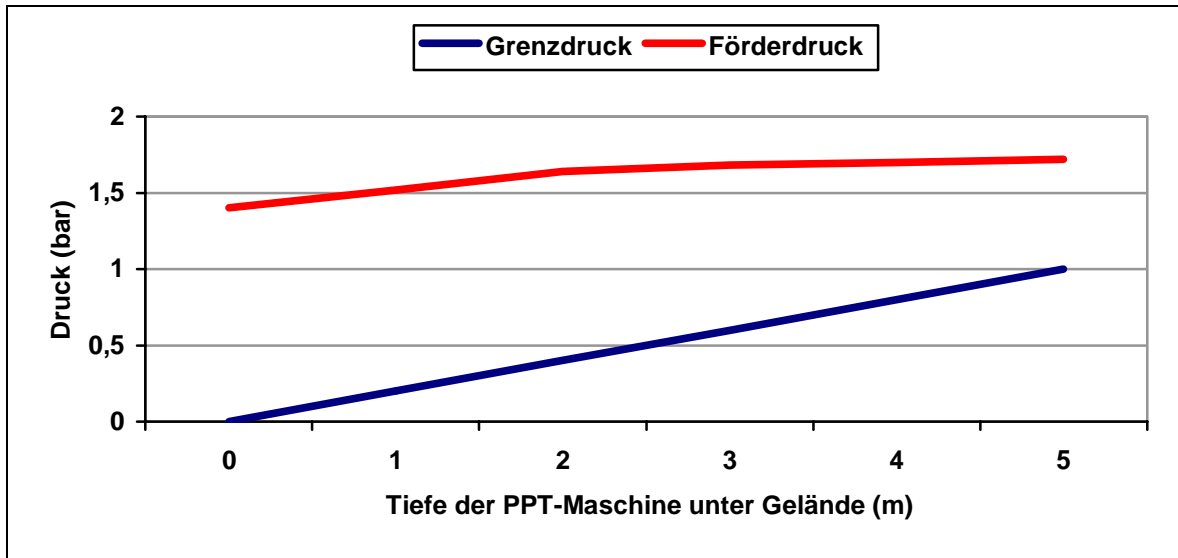


Abb. 4-52: Druckverhältnisse während des PPT-Versuchs (Anfahrbereich).

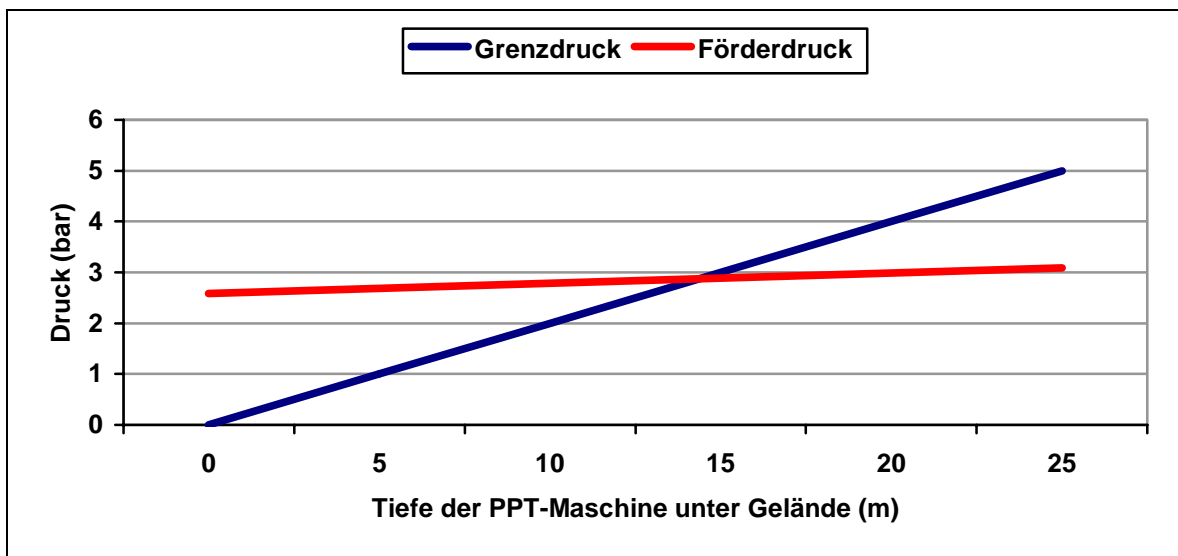


Abb. 4-53: Druckverhältnisse beim PPT-Vortrieb für das untersuchte Anwendungsbeispiel.

Nur wenn während der Durchführung der Feldversuche durch hohe Pumpraten $> 2.000 \text{ L/min}$ eine minimale Druckhöhe im Brecherraum aufgebaut (1,0 bar?) und gleichzeitig in der Förderleitung durch den Einsatz eines Saugwagens ein geringer Unterdruck erzeugt werden konnte (0,5 bar?), war es möglich, geringfügige Mengen der mit Bohrklein beladenen Bohrspülung durch die PPT-Maschine und die Förderleitung zu fördern (Förderdruck = 1,0 bar + 0,5 bar = 1,50 bar $>$ rechnerischer Fließwiderstand = 1,40 bar). Gleichzeitig waren aber weiterhin Ausbläser zu beobachten, da der Druck im Brecherraum in der relevanten Situation immer noch größer war als der zulässige Grenzdruck.

Fließgeschwindigkeit in der Förderleitung

Die bisherige Betrachtung des Förderkreislaufs beschränkte sich auf die Analyse und Bewertung der erforderlichen Drücke. Ein ganz wesentlicher Faktor für einen funktionierenden Förderkreislauf ist jedoch auch in der Realisierung einer ausreichenden Fördergeschwindigkeit in der Förderleitung zu sehen. Nach gängigen Untersuchungen liegt die Mindestgeschwindigkeit zur Verhinderung von Sedimentation beim Transport von kiesigen Gemischen in Bohrspülungen (horizontale Ausrichtung) bei ca. 2,50 m/s [4-54].

Bei den hier beispielhaft angestrebten Verhältnissen (Volumenstrom = 2.000 L/min, Durchmesser der Förderleitung = 200 mm) stellt sich jedoch eine maximale Fließgeschwindigkeit von nur 1,06 m/s ein.

Bei Vernachlässigung der Druckverluste in der PPT-Maschine sowie durch die Tiefenlage der PPT-Maschine (= statischer Druckanteil) wäre allein zur Überwindung der Fließwiderstände in der Förderleitung eine Druckhöhe von ca. 11 bar erforderlich, um eine Fließgeschwindigkeit > 2,50 m/s zu erreichen (Tab. 4-1). Die Förderleitung müsste für diesen Zweck in ihrem Durchmesser auf 125 mm reduziert werden.

Bei einer Reduktion der Pumprate auf 1.500 L/min ließe sich eine ausreichende Fließgeschwindigkeit erst bei einem Förderleitungsdurchmesser knapp über 110 mm mit etwa 12 bar Druck realisieren.

Tab. 4-1: Förderdruck und Fließgeschwindigkeit von Bohrspülung (mit Cuttings) in Förderleitungen mit unterschiedlichen Innendurchmessern (Volumenstrom = 2.000 L/min, Förderlänge = 1.000 m).

Durchmesser der Förderleitung (mm)	Förderdruck (bar)	Fließgeschwindigkeit (m/s)
100	32,64	4,24
125	11,18	2,72
150	4,66	1,89
175	2,22	1,39
200	1,17	1,06

Dies bedeutet, dass der dynamische Druck in erster Linie durch die erforderliche Fließgeschwindigkeit in der Förderleitung bestimmt wird. Um sämtliche Druckverluste (statisch und dynamisch) sicher bewältigen zu können, wird demnach

eine Druckhöhe zu Beginn der Förderleitung (hinter der PPT-Maschine) von ca. 10 bis 15 bar erforderlich. Dieser Druckbereich wird im Folgenden als Zielgröße diskutiert.

Zur Lösung der beschriebenen Problematik stehen aus heutiger Sicht folgende Optionen zur Diskussion:

- Förderpumpe in der PPT-Maschine
- Hydropneumatische Förderung
- Kombination aus Förderpumpe und hydropneumatischer Förderung

Darüber hinaus kann eine mögliche Alternative diskutiert werden:

- Neue Auslegung der Förderleitung (komplette Umstellung der Parameter der Förderleitung in Anlehnung an den HDD-Prozess, d.h. große Durchmesser, geringe Fließgeschwindigkeit, geringe Druckverluste)

Während die erste Variante (Förderpumpe) einen eher konservativen Lösungsansatz mit bewährten Bauteilen und Arbeitsweisen darstellt, repräsentiert die zweite Variante (hydropneumatische Förderung), zumindest in vornehmlich horizontal ausgerichteten Bohrlöchern, ein innovatives Verfahren. Auch die Kombination beider Verfahren stellt einen innovativen Ansatz mit spezifischen Vor- und Nachteilen für die diskutierte Aufgabenstellung dar.

Bei der Umstellung der Abmessungen der Förderleitung würde zwar einerseits die Fließgeschwindigkeit auf einen vergleichsweise sehr niedrigen Wert absinken, es ließen sich damit jedoch andererseits sehr niedrige Druckverluste in der Förderleitung realisieren.

Förderpumpe in der PPT-Maschine

Nach den oben durchgeführten Berechnungen muss eine in der PPT-Maschine (bzw. direkt dahinter) integrierte Förderpumpe imstande sein, eine mit Bohrklein (Kies) beladene Bohrspülung mit einem Volumenstrom von 2.000 L/min gegen eine Druckhöhe von 10 - 15 bar zu fördern. Nur bei diesen Leistungsdaten ließe sich gleichzeitig die gewünschte Fließgeschwindigkeit in der Förderleitung realisieren ($> 2,5$ m/s in einer 125er Leitung).

Für diese Aufgabenstellung eignen sich grundsätzlich so genannte Kreiselpumpen

(englisch: Slurry Pumps, Abb. 4-54 und 4-55). Einige Hersteller bezeichnen die entsprechenden Pumpen als Panzerpumpen [4-49, 4-50]. Die Pumpen können als Tauchpumpen eingesetzt werden. Die erforderliche Zuführung der elektrischen Energie für den Antrieb (Dichtung), auch bei so genannten Submersible Pumps, lässt den Einsatz in der Regel in feuchten Bedingungen zu, nicht jedoch unter Wasser und bei großem Außendruck [4-47].



Abb. 4-54: Slurry Pump oder Kreiselpumpe der mittleren Leistungsklasse [4-46].

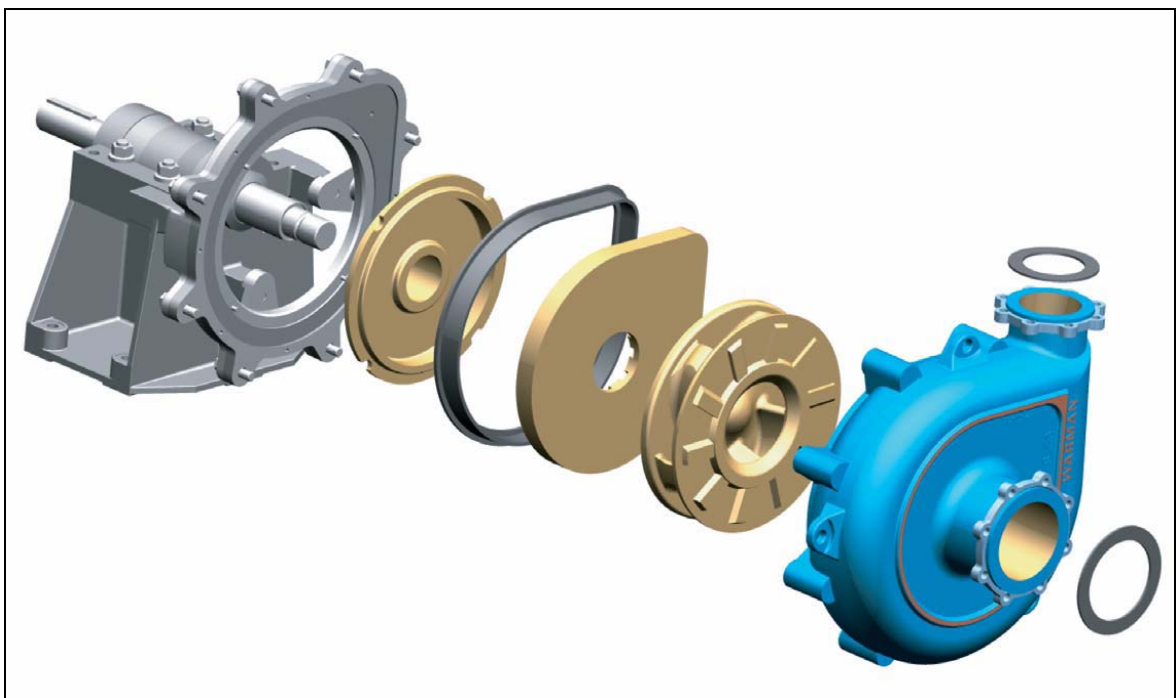


Abb. 4-55: Typischer Aufbau einer Medium Duty Slurry Pump [4-50].

Die Pumpen werden in einem sehr weiten Leistungsspektrum von $< 50 \text{ m}^3/\text{h}$ bis zu fast $20.000 \text{ m}^3/\text{h}$ und den entsprechend unterschiedlichen Abmessungen und Antriebsleistungen angeboten. Die typischen Förderdrücke liegen zwischen vier und sieben bar (Abb. 4-57), wobei einzelne Baureihen auch für bis zu 12,5 bar ausgelegt sind (Angaben jeweils für Wasser als Fördermedium) [4-48].

Kreiselpumpen lassen sich prinzipiell hintereinander schalten, wodurch sich die einzelnen Förderdrücke entsprechend addieren. Einige Baureihen sind für maximale Betriebsdrücke von deutlich mehr als 50 bar zugelassen. Die besondere Herausforderung bei dieser Pumpenkonstellation ist die Vermeidung von Kavitationen bei den jeweils nachgeschalteten Pumpen, um deren Beschädigungen sicher zu verhindern.

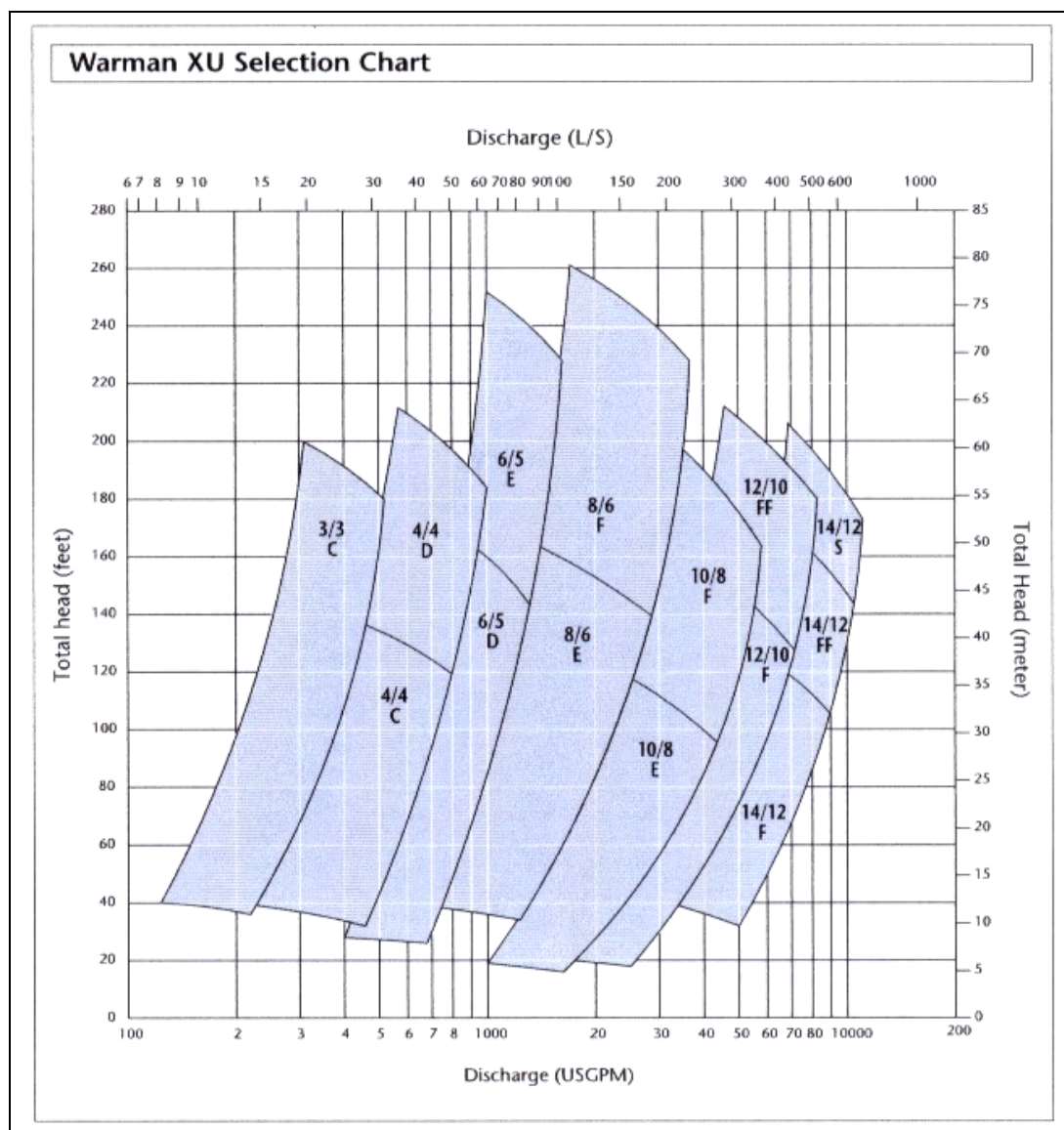


Abb. 4-56: Druck-Volumenstrom-Diagramm der XU-Baureihe der Fa. *Weir Warman Ltd.* [4-46].

Bei der Auswahl einer geeigneten Pumpe wird schnell deutlich, dass keines der in Frage kommenden Produkte die erforderliche Druckhöhe von mehr als 12 bar direkt erreichen kann und somit eine Reihenschaltung von z.B. drei Pumpen der Baureihe *Warman 4/4 DXU* erforderlich wird (Abb. 4-56).

Problematisch wird neben der oben erwähnten Ansteuerung der Pumpen (Vermeidung von Kavitation) insbesondere aber auch die Baugröße. Die beispielhaft ausgewählte Pumpe *Warman 4/4 DXU* misst ohne Antrieb etwa 1 m in der Länge und benötigt bei dem vorgesehenen Einbau in einem Rohr ca. 1 m Rohrdurchmesser.

Die kleinste Baugröße (3/3 CXU) dieses Herstellers fiel zwar deutlich kleiner aus (ein Rohrdurchmesser von ca. 700 mm wäre ausreichend), jedoch ist der maximale Volumenstrom von ca. 1.800 L/min etwas geringer als vorgesehen.

Für die kompletten Einheiten, bestehend aus Pumpe und Antrieb, sind Baulängen von ca. 1,5 bis 2,0 m erforderlich. Zur Lösung der vorliegenden Aufgabenstellung könnten somit beispielsweise drei komplette Einheiten in die oben vorgeschlagenen und den spezifischen Pumpenanforderungen angepassten Nachläufer eingebaut werden.

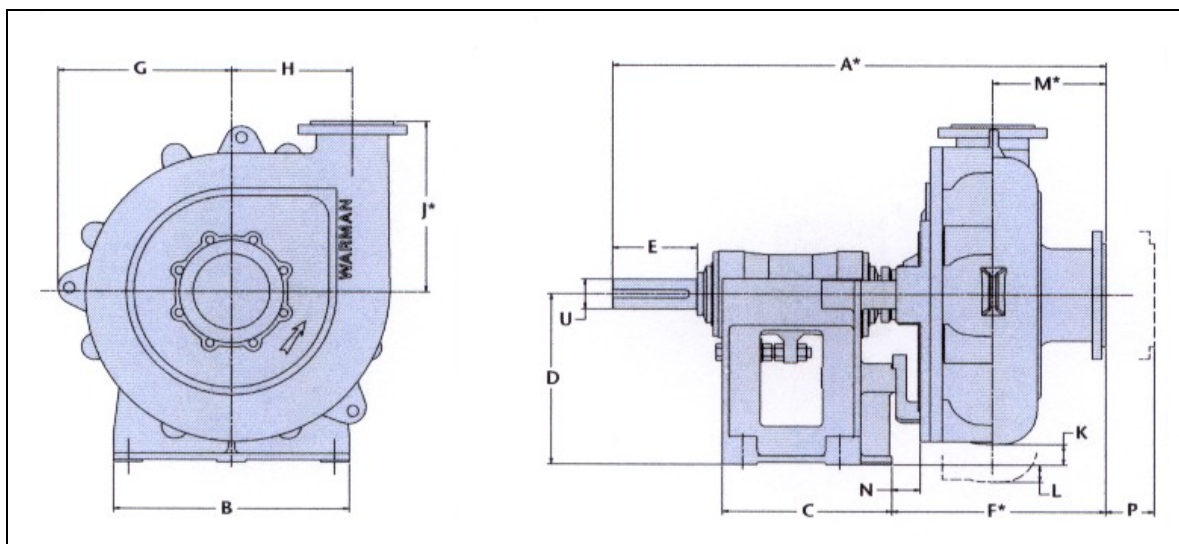


Abb. 4-57: Vorder- und Seitenansicht einer XU-Pumpe der Fa. *Weir Warman Ltd.* (ohne Antrieb) [4-46].

Es kann somit festgestellt werden, dass der Einbau von geeigneten Pumpen bei geringfügiger Anpassung des Anforderungsprofils (entweder größere Mindestrohr-

durchmesser oder etwas geringere Pumprate) technisch zwar möglich ist, aber einen hohen Steuerungs-, Fertigungs- und Montageaufwand bedeutet. Außerdem sollte nicht unterschätzt werden, dass die Pumpen während des Betriebs (zumindest bei den kleineren der vorgesehenen Rohrdurchmesser) nicht zugänglich sind und somit Störungen bzw. Totalausfälle durchaus zu einem Scheitern des gesamten Bauvorhabens führen können.

Hydropneumatische Förderung

Bei der hydropneumatischen Förderung (auch als Lufthebeverfahren oder Airlift-Verfahren bezeichnet) handelt es sich um ein seit 1797 bekanntes Prinzip zur Hebung von Flüssigkeiten durch Einblasen von Druckluft in ein mit einer Flüssigkeit gefülltes, in der Regel senkrecht stehendes Rohr [4-51].

Für die Anwendung bei senkrechten Bohrlöchern liegen zahlreiche wissenschaftliche Arbeiten und Firmenpublikationen vor, die sich mit dieser Thematik sowie den damit verbundenen physikalischen Grundlagen befassen [4-52, 4-53].

Im Rahmen einer umfangreichen Versuchsreihe in den Labors der Technischen Universität Clausthal (Lehrstuhl für Tagebau und Internationaler Bergbau) wurde die Übertragbarkeit der bekannten, positiven Effekte des Lufthebeverfahrens bei vertikaler Ausrichtung der Bohrlöcher auf solche Bohrlöcher überprüft, die im Wesentlichen horizontal oder schräg verlaufen (Abb. 4-58 und 4-59).

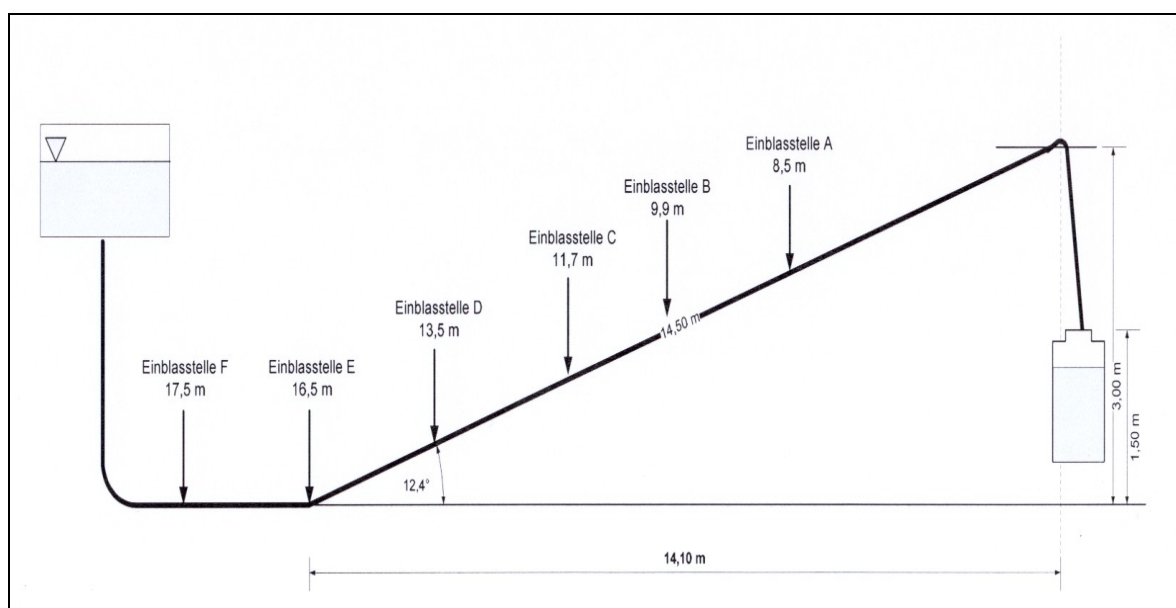


Abb. 4-58: Prinzipieller Versuchsaufbau zur Untersuchung der hydro-pneumatischen Förderung in schrägen Förderleitungen in den Labors der TU Clausthal. [4-53].



Abb. 4-59: Anordnung der Systemkomponenten zur Untersuchung der hydropneumatischen Förderung in den Labors der TU Clausthal. [4-53].

Die wesentlichen Ergebnisse der erwähnten Versuche können wie folgt zusammengefasst werden [4-53]:

- Die Förderung bzw. der Transport eines Feststoffs mittels Lufthebeverfahren ist auch über horizontale Streckenabschnitte möglich, wenn am Ende der Förderleitung ein vertikaler oder schräger Abschnitt vorliegt.
- Die optimale Einblasstelle liegt in der Regel am tiefsten Punkt der Förderleitung.
- Die Anordnung mehrerer Einblasstellen in der Förderleitung kann sich positiv auf die Förderleistung auswirken, dabei ist jedoch beim Anfahren des Systems darauf zu achten, dass die Einblasstellen in der Reihenfolge ihrer Entfernung vom Bohrlochmund eingeschaltet werden.

Wie in den vorherigen Abschnitten gezeigt, sind bei den zu Grunde gelegten Rahmenbedingungen etwa 10 bis 15 bar Druck am Anfang der Förderleitung erforderlich, um die statischen und dynamischen Widerstände zu überwinden und dabei eine Fließgeschwindigkeit der mit Cuttings beladenen Bohrspülung von $>2,50 \text{ m/s}$ in der Förderleitung zu erreichen.

Mit Hilfe des Lufthebeverfahrens lässt sich die Dichte der Flüssigkeitssäule in der Förderleitung verringern, indem Luft in diese Leitung eingeblasen wird und das entstehende Luft-Flüssigkeitsgemisch eine geringere Dichte aufweist als die Flüssigkeit allein (Abb. 4-60).

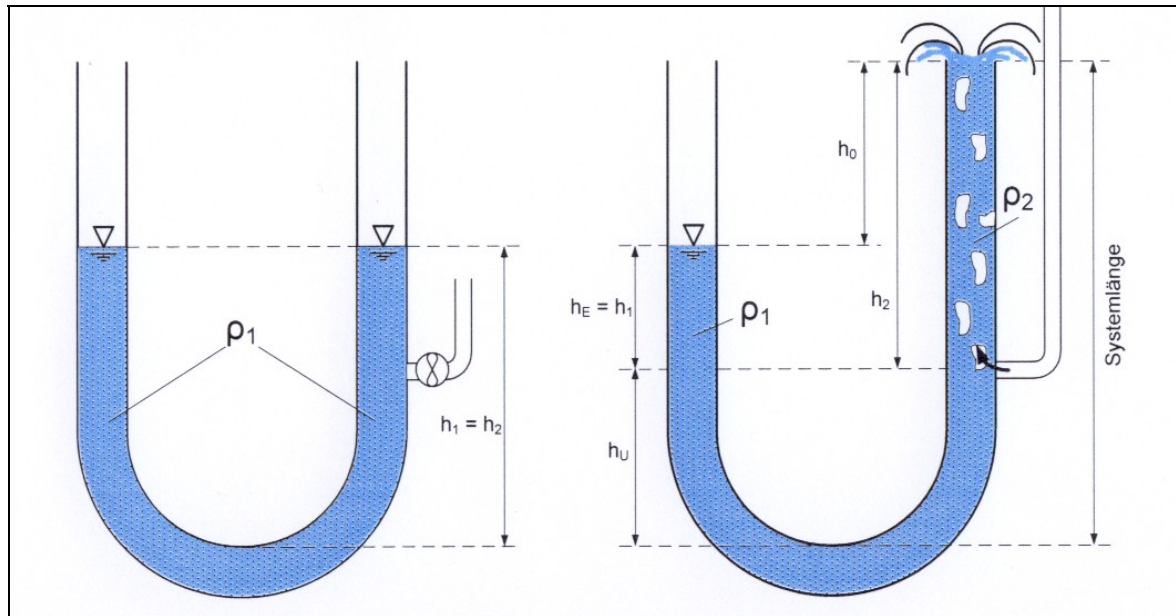


Abb. 4-60: Grundsätzliche Druckverhältnisse beim Lufthebeverfahren [4-52].

Am Beispiel des U-Rohrs lauten die relevanten Grundgleichungen:

F-4/10	$H_1 \cdot \rho_1$	=	$H_2 \cdot \rho_2$	[kg/m ²]
---------------	--------------------	---	--------------------	----------------------

mit:

H_1	=	Höhe der Flüssigkeitssäule über Einblastiefe	[m]
ρ_1	=	Dichte der Flüssigkeit	[kg/m ³]
H_2	=	Höhe des Flüssigkeits-Luft-Gemischs über Einblastiefe	[m]
ρ_2	=	Dichte des Flüssigkeits-Luft-Gemischs	[kg/m ³]

F-4/11	H_0	=	$H_2 - H_1$	[m]
---------------	-------	---	-------------	-----

mit:

H_0	=	Förderhöhe des Flüssigkeits-Luft-Gemisch	[m]
H_1	=	Höhe der Flüssigkeitssäule über Einblastiefe	[m]
H_2	=	Höhe des Flüssigkeits-Luft-Gemischs über Einblastiefe	[m]

Befindet sich im dargestellten Beispiel Wasser mit der Dichte von 1.000 kg/m^3 im U-Rohr auf einer Höhe H_1 von 20 m und wird diese Dichte durch das Einblasen von Luft auf eine Dichte von 600 kg/m^3 reduziert, so ergibt sich mit Formel F-4/10 eine maximale Höhe H_2 von 33,3 m. Somit könnte der Auslauf (= Förderhöhe H_0) ca. 13,3 m höher liegen als der Stand der Flüssigkeitssäule.

Prinzipiell ist dieses Modell auch auf die oben betrachteten Bauzustände 1 und 2 anzuwenden, indem der linke Teil des U-Rohrs die Druckverhältnisse im Brecherraum der PPT-Maschine darstellt. Wie gezeigt, ist dieser Druck von den örtlichen Bodenbedingungen abhängig (\rightarrow Grenzdruck p_G) und steht unmittelbar unterhalb der Einblasstelle in der Förderleitung an. Dieser Druck (p_x) kann bei der hydropneumatischen Förderung maximal genutzt werden, um die Fließwiderstände in der Förderleitung zu überwinden. Er berechnet sich nach Formel F-4/12:

F-4/12	P_x	=	$P_G - (H_1 + H_2) \cdot \rho_2 \cdot g / 10^5$	[bar]
---------------	-------	---	---	-------

mit:

P_x	=	Druck zu Beginn der Förderleitung	[bar]
P_G	=	Grenzdruck im Brecherraum	[bar]
H_1	=	Höhe der Flüssigkeitssäule unter GOK	[m]
H_2	=	Höhe der Flüssigkeitssäule über GOK	[m]
ρ_2	=	Dichte des Flüssigkeits-Luft-Gemischs	[kg/m ³]
g	=	Erdbeschleunigung (= 9,81)	[m/s ²]

Kann beispielsweise die Dichte des Flüssigkeits-Luft-Gemischs auf 600 kg/m^3 reduziert werden, so berechnet sich der gesuchte Druck P_x für den Bauzustand 1 zu ca. -0,15 bar ($p_G = 0,06 \text{ bar}$, $H_1 + H_2 = 3,5 \text{ m}$) und im Bauzustand 2 zu ca. 3,32 bar ($p_G = 5,00 \text{ bar}$, $H_1 + H_2 = 28,5 \text{ m}$).

Im Anfahrzustand (= Bauzustand 1) kann die hydropneumatische Förderung somit allein keinen Förderkreislauf etablieren.

Im Bauzustand 2, der optimale Bedingungen für die hydropneumatische Förderung aufweist, steht maximal ein Druck von etwa 3,32 bar zur Überwindung der Fließwiderstände in der Förderleitung zur Verfügung. Bei einem berechneten Druckbedarf von 3,08 bar (s.o.) könnte die hydropneumatische Förderung in

diesem Bauzustand funktionieren, allerdings nur in einem relativ eng begrenzten Bohrlochabschnitt.

Es ist damit insgesamt festzustellen, dass diese Form der Förderung der mit Bohrklein beladenen Bohrspülung für die skizzierten Anwendungsfälle beim PPT-Verfahren allein nicht ausreicht.

Kombination aus Förderpumpe und hydropneumatischer Förderung

Wie bereits dargelegt, ist über den gesamten Bohrungszyklus eine Druckhöhe am Anfang der Förderleitung von ca. 10 bis 15 bar erforderlich. Während der Anfahrssituation kann durch die hydropneumatische Förderung keine Unterstützung für die Ingangsetzung des Förderkreislaufs erbracht werden, so dass sich die Auslegung der Pumpenkapazität zwangsläufig an diesem Bauzustand orientieren muss. Demzufolge müssten etwa drei Kreislaspumpen in Reihe geschaltet werden, um die Zielgrößen zu erreichen.

Während des Bohrprozesses könnte die hydropneumatische Förderung zu einer Entlastung der Pumpen und ggf. zum Betrieb von nur zwei Kreislaspumpen führen. Es bleibt allerdings sorgfältig zu prüfen, wie sich Druckstöße in der Förderleitung (durch die Luftblasen) auf den Betrieb der Pumpen auswirken.

Es kann trotzdem davon ausgegangen werden, dass die Kombination von Pumpen und hydropneumatischer Förderung im Vergleich zu den bisher diskutierten Einzellösungen die beste Variante hinsichtlich der Förderleistung darstellt. Es ist jedoch eingehend zu prüfen, ob der Zugewinn an Leistung in einem sinnvollen Verhältnis zum zusätzlichen maschinentechnischen und steuerungstechnischen Aufwand steht.

Neue Auslegung der Förderleitung

Der Durchmesser der Förderleitung hat nach Formel F-4/8 den größten Einfluss auf den erforderlichen Druck zum Transport der Cuttings, während z.B. die plastische Viskosität der Trägerflüssigkeit nur von untergeordneter Bedeutung ist. Aus diesem Grund sind bei HDD-Projekten mit offenem Bohrloch (d.h. kein Bohrlocheinsturz) praktisch nie Ausbläser während der Aufweitgänge zu beobachten. Der offene Querschnitt ist ausreichend groß, so dass dieser Fließweg

nahezu immer den geringsten Fließwiderstand aufweist und demzufolge von der Bohrspülung auf ihrem Weg zur Tagesoberfläche gewählt wird.

Weltweit wurden Tausende Projekte nach dem HDD-Verfahren erfolgreich ausgeführt, wobei eine große Anzahl dem Maxi-Rig-Bereich zuzuordnen ist, d.h. es wurden Pipelines mit großem Durchmesser (> 500 mm) über größere Längen (> 500 m) eingezogen.

Verfahrensbedingt mussten dabei die Bohrlöcher auf Durchmesser zwischen 600 mm und 1.700 mm aufgeweitet werden. Bei maximalen Spülungsraten zwischen ca. 2.000 L/min und 4.000 L/min ergeben sich damit Fließgeschwindigkeiten im Bohrloch (beim HDD = Förderleitung) von etwa 1 cm/s bis 25 cm/s. Dieser Wert entspricht nur etwa 0,4% bis 10% der bisher angesetzten Mindestgeschwindigkeit von 250 cm/s.

Aus diesem Grund ist es möglicherweise sinnvoll, eine geringere Fließgeschwindigkeit in der Förderleitung zu akzeptieren (z.B. 25 cm/s) und dabei ggf. die Viskosität der Bohrspülung zu erhöhen. Mit diesen HDD-Verhältnissen eröffnet sich ein weites Optimierungsfeld dieses kritischen Aspekts.

Bei einer Vergrößerung des Durchmessers der Förderleitung auf z.B. 400 mm ergeben sich in Abhängigkeit der Förderlänge die in Tab. 4-2 gezeigten Druckverhältnisse und Strömungsgeschwindigkeiten für eine laminare Strömung.

Tab. 4-2: Förderdruck und Fließgeschwindigkeit von Bohrspülung (mit Cuttings) in einer Förderleitung mit 400 mm Innendurchmesser und einer Pumprate von 2.000 L/min bei unterschiedlichen Förderlängen.

Länge der Förderleitung (m)	Förderdruck (bar)	Fließgeschwindigkeit (m/s)
500	0,25	0,27
750	0,38	0,27
1.000	0,50	0,27

Mit den getroffenen Annahmen hinsichtlich des Grenzdrucks ließe sich in den An- und Ausfahrbereichen der Bohrung zwar immer noch kein Förderkreislauf allein mit der Hochdruckpumpe an der Rigsite etablieren, allerdings könnte ab einer Überdeckung von etwa 10 m derjenige Tiefenbereich erreicht werden, in dem das ursprünglich angedachte Verfahren grundsätzlich funktioniert.

Empfehlungen

Sämtliche der vorgestellten Lösungsmöglichkeiten sind jeweils für sich genommen unbefriedigend.

Die Förderpumpen hinter der PPT-Maschine müssten aufgrund der erforderlichen Druckhöhe in Reihe geschaltet sowie individuell mit Energie und Steuersignalen versorgt werden. Bei einem Defekt wäre die weitere Projektausführung gefährdet.

Die hydropneumatische Förderung allein kann wegen der ungünstigen Rahmenbedingungen bei der grabenlosen Pipelineverlegung (geringer Grenzdruck im An- und Ausfahrbereich der Bohrungen) die gestellte Aufgabe nicht lösen.

Eine Kombination aus Pumpen und hydropneumatischer Förderung führt wahrscheinlich zu einer Leistungssteigerung, die Problematik im An- und Ausfahrbereich kann allerdings ebenfalls nicht gelöst werden. Zudem würde die Kombination dieser beiden Förderverfahren die Ansprüche hinsichtlich der Energieversorgung (Druckluft und elektrische Energie) und der Steuertechnik (Stichwort: Druckstöße) weiter verkomplizieren.

Es wird deshalb folgende Vorgehensweise empfohlen:

1. Grundsätzliche Neuauslegung der Rahmenbedingungen für die Förderleitung in Anlehnung an die entsprechenden Bedingungen beim HDD (größere Durchmesser, kleinere Fließgeschwindigkeit).
2. Einsatz einer geeigneten Förderpumpe direkt hinter der MT-Maschine bzw. den Nachläufern, ggf. unterstützt durch eine weitere Pumpe an geeigneter Stelle im Rohrstrang.

4.4 Wirtschaftliche Aspekte

Da im Zusammenhang mit dem PPT-Verfahren noch wichtige Aspekte, insbesondere der Maschinentechnik, näher untersucht und weiter entwickelt werden müssen, ist es an dieser Stelle nicht möglich, hinreichend genaue und belastbare Bewertungen der Wirtschaftlichkeit dieser Technologie vorzunehmen.

4.5 Verfahrensbewertung

In diesem Abschnitt wird untersucht und bewertet, inwiefern das neu entwickelte PPT-Verfahren die eingangs diskutierten Zielvorgaben hinsichtlich der Parameter

- geometrische Leistungsgrenzen,
- Aspekte des Baugrunds,
- einsetzbare Rohrmaterialien und
- wirtschaftliche Aspekte

erfüllt. Anschließend werden diese Einschätzungen als Zwischenergebnis zusammengefasst.

Geometrische Leistungsgrenzen

Der aus heutiger Sicht abschätzbare Verlegebereich des PPT-Verfahrens umfasst die in Abb. 4-61 dargestellten Dimensionen. Dabei ist zunächst zu erkennen, dass die maximal angestrebten Verlegelängen für keinen Rohrdurchmesser realisiert werden können.

1200																
1100																
1000																
900																
800																
Produktrohr-Ø (mm)	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800	850	900	950	1000	
	Rohrlänge (m)															

Abb. 4-61: Darstellung der abgeschätzten geometrischen Leistungsgrenzen des PPT-Verfahrens (gerundete Werte) im Vergleich zu den Zielvorgaben (grün umrandeter Bereich).

Für die größeren Durchmesser (DN 1000 bis DN 1200) ist der Einsatz von Vortriebsmaschinen denkbar, bei denen ein In-Situ-Werkzeugwechsel möglich ist und somit die dargestellte Verlegelänge relativ sicher realisiert werden kann. Diese Variante kann für kleinere Rohrdurchmesser nicht eingesetzt werden, da hier der manuelle Zugang bis zur Vortriebsmaschine nicht möglich bzw. nicht erlaubt ist. Zudem wird beim Einsatz einer großen Vortriebsmaschine für ein kleines Rohr zwangsläufig ein großer Überschnitt erstellt, was sich bei der Übertragung der Vorschubkräfte des Pipe Thruster negativ auswirken könnte (Knickgefahr).

Gelingt es also nicht, die Standzeiten der Schneidradwerkzeuge durch Verstärkung der hydraulischen Lösekomponente signifikant gegenüber den heutigen

MT-Werten zu steigern, wären für Rohrdurchmesser DN 800 bis DN 1000 wahrscheinlich nur Verlegelängen bis ca. 300 m möglich (je nach Bodenbedingungen).

Es kann somit festgehalten werden, dass die angestrebten Verlegeleistungen vom PPT-Verfahren nicht erreicht werden können.

Aspekte des Baugrunds

Die sichere Bewältigung des Baugrunds durch das jeweilige Verfahren hat einen direkten Einfluss auf das immanente wichtige Baurisiko.

Durch den Einsatz der geplanten Vortriebsmaschinen können die avisierten Bodenbedingungen (sandiger Kies mit Steinen bis 300 mm) sicher bewältigt werden.

Allerdings kann nicht ganz ausgeschlossen werden, dass das Bohrloch bei besonders instabilen Baugrundbedingungen zumindest partiell wieder einstürzt, nachdem die Vortriebsmaschine diesen Bereich passiert hat. Infolgedessen können sich größere Kieskörner bzw. einzelne Steine zwischen Bohrlochwand und Rohraußenseite verklemmen und dabei entweder die Rohrumhüllung oder sogar den Rohrkörper beschädigen.

Diese Gefahr wird im Vergleich zum HDD-Verfahren als geringer eingeschätzt, da die direkt im Bereich des Schneidrads liegenden Steine von diesem zerkleinert und in der Förderleitung sicher aus dem Bohrloch transportiert werden.

Insgesamt wird das mit dem Einsatz des PPT-Verfahrens unter den vorgegebenen geologischen Bedingungen verbundene Baurisiko geringer als beim Einsatz des HDD-Verfahrens, allerdings höher als beim Einsatz des MT-Verfahrens eingeschätzt.

Einsetzbare Rohrmaterialien

Der Einsatz von Stahlrohren ist beim PPT-Verfahren uneingeschränkt möglich.





Wirtschaftliche Aspekte

Eine Bewertung der wirtschaftlichen Aspekte ist aus heutiger Sicht nicht möglich (siehe auch Abschnitt 4.4).

Zwischenergebnis zum PPT-Verfahren

Die Erfüllung der gestellten Zielvorgaben durch das PPT-Verfahren kann aus heutiger Sicht gemäß den Bewertungen in Tab. 4-3 eingeschätzt werden.

Tab. 4-3: Wesentliche Zielvorgaben für ein neues Verlegeverfahren sowie Angaben, inwiefern diese Vorgaben durch das PPT-Verfahren erfüllt werden können.

 = Zielvorgabe erfüllt	 = Zielvorgabe nicht erfüllt
 = Zielvorgabe nur teilweise erfüllt	 = Keine Bewertung möglich

Kriterium	Zielvorgabe	PPT
Rohrdimensionen	D = 800 - 1200 mm, L = 500 - 1.000 m	Besonders bei kleinen Ø wohl nicht erreichbar
Aspekte des Baugrunds	Sandiger Kies mit Steinen (bis 300 mm)	Sehr wahrscheinlich möglich
Geeignete Rohrmaterialien	Stahl	Uneingeschränkt möglich
Wirtschaftliche Aspekte	Wenn möglich < MT- Kosten	Zur Zeit keine Einschätzung möglich

Als Schwachpunkt des Verfahrens kann zur Zeit die längenmäßige Beschränkung, besonders bei Rohrdurchmessern zwischen 800 und 1.000 mm, angesehen werden.

Demgegenüber werden die Vorgaben hinsichtlich der geologischen Bedingungen und der einzusetzenden Rohrmaterialien vom PPT-Verfahren wohl erfüllt.

Hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit ist momentan keine belastbare Bewertung möglich.

Zusätzlich ist an dieser Stelle darauf hinzuweisen, dass die oben vorgeschlagenen Optimierungen des Verfahrens bzw. der Maschinenteknik in der vorgesehenen Art und Weise umgesetzt werden müssen, um die in Tab. 4-3 dargelegten Einschätzungen erreichen zu können.

4.6 Ausblick

Für die weitere Entwicklung des PPT-Verfahrens erscheint es zwingend erforderlich, zumindest die in dieser Arbeit vorgeschlagenen Optimierungen vorzunehmen und in einem weiteren Feldversuch zu testen. Die damit verbundenen Kosten werden auf mehrere hunderttausend Euro geschätzt (Konstruktion, Bau, Feldversuch, Dokumentation, Auswertung etc.).

Da das nachfolgend vorgestellte EP-Verfahren hinsichtlich der Verfahrens- und Maschinentechnik mit wesentlich geringeren Risiken verbunden ist, ist es im Hinblick auf die gegenwärtige Situation in der Bauindustrie wahrscheinlich schwierig, die hierfür erforderlichen Mittel aufzubringen und das PPT-Verfahren in der näheren Zukunft bis zur wirtschaftlichen Einsatzreife weiterzuentwickeln.

Als positives Ergebnis der bisherigen Arbeiten sind jedoch die zusätzlichen Impulse für den Pipe Thruster, als einer der Hauptkomponenten des PPT-Verfahrens, anzuerkennen. Hier kann eingeschätzt werden, dass die erste Einheit noch im Jahr 2006 eingesetzt wird. Aus heutiger Sicht wird dieser Ersteinsatz voraussichtlich bei einem HDD-Projekt (48 Zoll) mit neun Kreuzungsstellen in Indien der Fall sein.

Die theoretischen Erkenntnisse und die Auswertungen der Feldversuche sollten nicht unterschätzt werden. Auch wenn deren Ergebnisse letztendlich zu einem ,im nachfolgenden Kapitel beschriebenen, anderen Verlegeverfahren (EP) geführt haben, so haben sie am Ende dennoch dazu beigetragen, neben den etablierten Techniken HDD und MT eine weitere Methode zur grabenlosen Rohrverlegung zu entwickeln.

5 Easy Pipe - Verfahren (EP)

5.1 Verfahrensbeschreibung

Auch das EP-Verfahren wurde als 2-Schritt-Verfahren ausgelegt, bestehend aus den beiden Arbeitsschritten

- Bohrung und
- Einziehvorgang.

Im ersten Arbeitsschritt wird eine gesteuerte Bohrung durchgeführt, bei der schon der erforderliche Enddurchmesser des Bohrlochs erreicht wird. Im zweiten Arbeitsschritt wird dann die zu verlegende Rohrleitung in dieses Bohrloch eingezogen [5-1].

5.1.1 Bohrung

Zunächst wird in einer Startbaugrube eine MT-Bohrvorrichtung, bestehend aus den üblichen Komponenten wie z.B. Pressvorrichtung, Druckring, Bohrkopf und Vortriebsrohre, vorbereitet und eingerichtet. Mit Hilfe dieser Bohrvorrichtung wird gemäß den gültigen technischen Regeln beim gesteuerten Rohrvortrieb eine Bohrung entlang einer vorgegebenen Bohrlinie aufgefahren. Hierbei wird der Bohrkopf von der Pressvorrichtung über den Druckring und die Vortriebsrohre mit der für den Bohrvorgang erforderlichen Andruckkraft beaufschlagt (Abb. 5-1).

Die Vortriebsrohre stabilisieren den Bohrkanal, so dass ein Zusammenstürzen des Bohrlochs auch in nicht standfesten Formationen ausgeschlossen ist. Die Vermessung der Position und die Steuerung des Bohrkopfes entlang der vorgegebenen Bohrlinie erfolgen ebenfalls gemäß den gängigen Techniken des gesteuerten Rohrvortriebs (z.B. mittels Kreiselkompass).

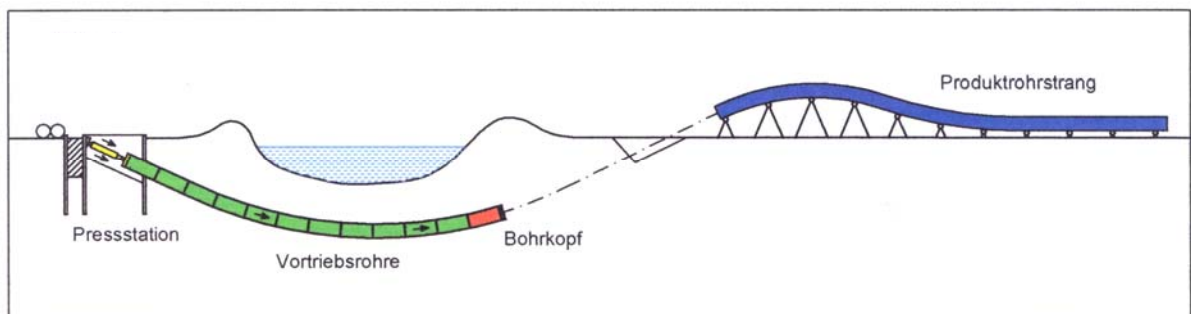


Abb. 5-1: Erstellung der Bohrung beim EP-Verfahren (Prinzip).

5.1.2 Einziehvorgang

Nachdem der Bohrkopf am Zielpunkt in der Baugrube angekommen ist, wird er von den Vortriebsrohren getrennt. Danach wird das erste Vortriebsrohr über ein Verbindungsrohr mit dem in Länge der Bohrung vorbereiteten und geprüften Produktrohrstrang zugfest verbunden (Abb. 5-2).

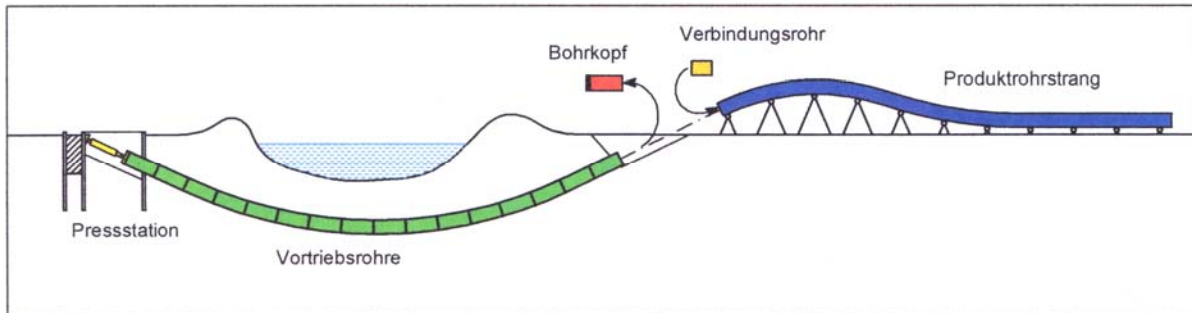


Abb. 5-2: Vorbereitung des Einziehvorgangs beim EP-Verfahren (Prinzip).

Im nächsten Arbeitsschritt werden die über zugfeste Verbindungen miteinander gekoppelten Vortriebsrohre von der Pressvorrichtung durch das Bohrloch zurückgezogen, wobei gleichzeitig auch das Verbindungsrohr und der Produktrohrstrang in Richtung Startpunkt, entlang der Bohrlinie, bewegt werden.

In der Startbaugrube werden die einzelnen Vortriebsrohre sukzessive demontiert und entfernt. Dabei werden auch die in den Interimsrohren integrierten Verbindungsleitungen, die während der Bohrungsdurchführung den Bohrkopf mit elektrischer und/oder hydraulischer Energie und Steuersignalen versorgten sowie die Bohrspülungsver- und -entsorgung ermöglichten (Förder- und Speiseleitung), an den Koppelungsstellen getrennt und mit den Interimsrohren aus der Baugrube entfernt. Dieser Vorgang wird solange fortgesetzt, bis das Verbindungsrohr und der Beginn des Produktrohrstrangs im Startschacht angekommen sind (Abb. 5-3).

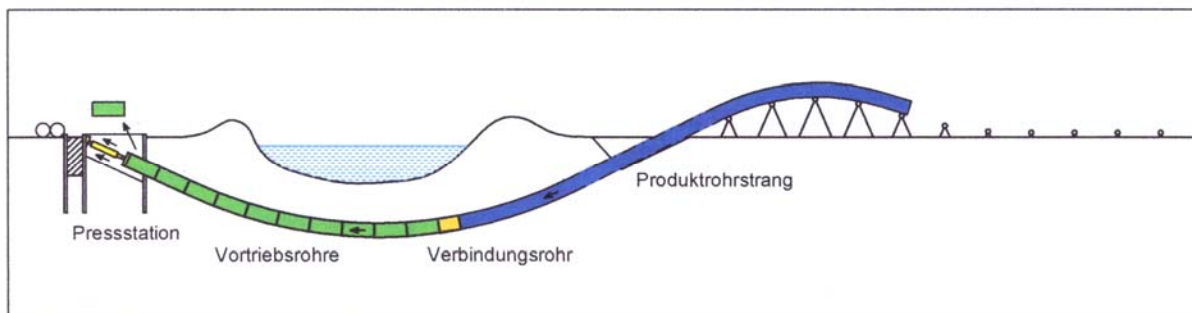


Abb. 5-3: Einziehvorgang beim EP-Verfahren (Prinzip).

Im Anschluss wird das Verbindungsrohr vom Produktrohrstrang getrennt und aus der Baugrube entfernt. Auch die Pressvorrichtung wird demontiert und abtransportiert. Abschließend kann der Produktrohrstrang mit der Pipeline verbunden und die beiden Baugruben verfüllt bzw. rückgebaut werden (Abb. 5-4).

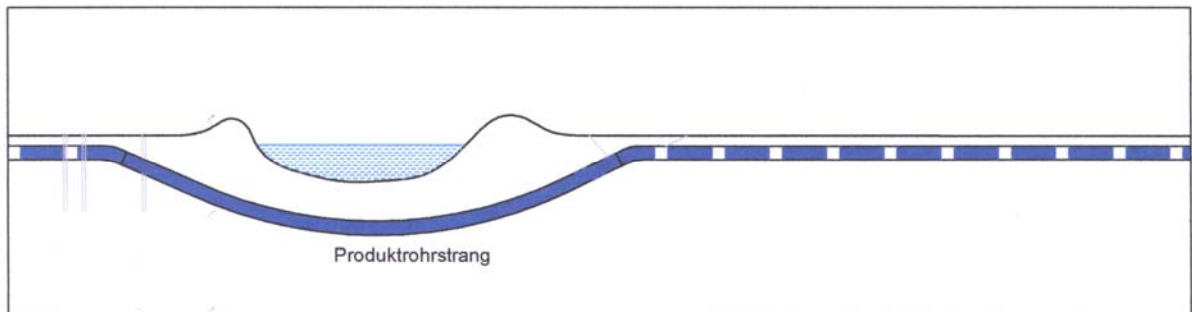


Abb. 5-4: Einbindung der eingezogenen Rohrleitung beim EP-Verfahren (Prinzip).

5.2 Systemkomponenten

5.2.1 Maschinentechnik

Die meisten der nachfolgend aufgeführten, maschinentechnischen Komponenten beim EP-Verfahren gleichen den entsprechenden Bauteilen beim konventionellen Microtunneling:

- Pressstation,
- Micromaschine (Bohrkopf),
- Betriebscontainer,
- Vermessungssystem,
- Bohrspülmischanlage,
- Bohrspülaufbereitungsanlage,
- Förder- und Speisepumpen,
- Bentonit-Schmiersystem,
- Vortriebsrohre,
- Dehnerstationen und
- Verbindungsrohr.

Die genannten Komponenten werden nachfolgend kurz beschrieben und in ihrer jeweiligen Funktion erläutert.

Presstation

Das als Presstation bezeichnete Bauteil erzeugt beim EP-Verfahren nicht nur die für die Bohrlocherstellung notwendige Druckkraft, sondern auch die für den Einziehvorgang erforderliche Zugkraft. Für diese bi-funktionale Auslegung sind einige maschinentechnische Anpassungen erforderlich. Im Wesentlichen bleiben aber Aufbau und Design so erhalten, wie sie aus dem MT bekannt sind (Abb. 5-6).

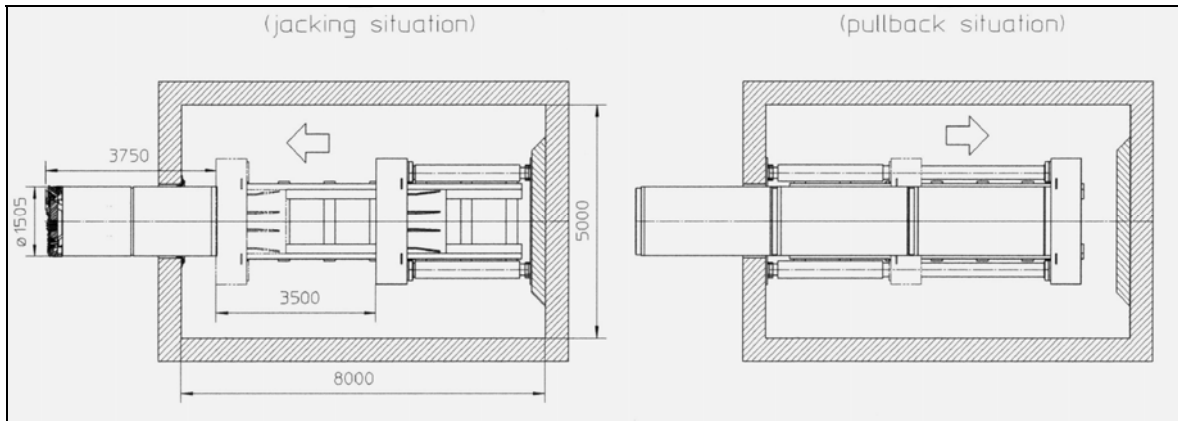


Abb. 5-5: Prinzipielle Funktion einer EP-Pressstation [5-2].



Abb. 5-6: Pressstation beim Einsatz im konventionellen MT [5-1].

Die Dimensionierung dieser Systemkomponente orientiert sich an den zu erwartenden Druckkräften bei der Bohrungserstellung sowie den Zugkräften während des Einziehvorgangs.

Für diese beiden Größen

- Druckkraft und
- Zugkraft

wird nachfolgend eine Abschätzung der zu erwartenden Anforderungen durchgeführt.

Druckkraft

Eine hohe Druckkraft wird während der eigentlichen Bohrungserstellung (erster Arbeitsschritt) für die drei Komponenten

- Reibung zwischen Rohroberfläche und Bohrspülung (F_{4-1}),
- Reibung zwischen Rohroberfläche und Bohrlochwand (F_{4-2}) sowie
- Erforderliche Andruckkraft für das Schneidrad (F_5)

benötigt. Die Abschätzung der erforderlichen Einzelkräfte kann aufgrund der großen Ähnlichkeit dieses Arbeitsschritts mit dem entsprechenden Vorgang beim MT analog den dort üblichen Formeln und Richtwerten vorgenommen werden [5-4, 5-5]. Hierbei ist zu beachten, dass nach gängiger Praxis die Einzelkräfte F_{4-1} und F_{4-2} zusammengefasst werden, wobei die resultierende Kraft nachfolgend als Mantelreibung F_4 bezeichnet wird.

Mantelreibung F_4

Die Berechnung der Mantelreibung erfolgt analog der Ermittlung der Reibungskraft zwischen Rohroberfläche und Bohrspülung bei der Dimensionierung des Bohrgeräts für das PPT-Verfahren (F-4/1).

Der Reibungsbeiwert wird in Anlehnung an [5-4] mit $5,0 \text{ kN/m}^2$ angesetzt. Damit liegt dieser Wert etwas unterhalb des in [5-4] empirisch für das Microtunneling ermittelten Richtwerts, diese Verringerung erscheint aber sinnvoll zu sein, da der Ringspalt beim EP-Verfahren größer ist als beim konventionellen Microtunneling. Aus diesem Grund ist eine größere Reibungsminderung durch die in diesen Bereich verpumpte Bohrspülung zu erwarten.

F-5/1	F_4	=	$A_{\text{spez}} * L * \mu_4$	[kN]
--------------	-------	---	-------------------------------	------

mit:

F_4	=	Mantelreibung	[kN]
A_{spez}	=	spezifische Rohroberfläche	[m²/m]
L	=	Bohrungslänge	[m]
μ_4	=	Reibungsbeiwert (hier: 5,0)	[kN/m²]

Bei den angestrebten Verlegeleistungen (maximal: 1.000 m Länge, DN 1200 Rohrleitung) ergibt sich mit den ausgewählten Werten eine Mantelreibung von maximal ca. 18.850 kN.

Erforderliche Andruckkraft für das Schneidrad (F_5)

Auch die Andruckkraft für das Schneidrad kann analog dem Microtunneling und somit wie in Abschnitt 4.2 vorgenommen werden (F-5/2).

F-5/2	F_5	=	$S_{\text{spez}} * \mu_5$	[kN]
--------------	-------	---	---------------------------	------

mit:

F_5	=	Andruckkraft am Schneidrad	[kN]
S_{spez}	=	spezifische Schneidradfläche	[m²]
μ_5	=	spezifischer Anpressdruck (hier: 300)	[kN/m²]

Mit diesen Annahmen berechnet sich der Maximalwert (Schneidraddurchmesser ca. 1,5 m) zu ca. 530 kN.

In der Summe ergibt sich somit für die maximal zu erwartende Druckkraft ein Wert von 19.380 kN. Diese hohe Druckkraft muss allerdings nicht allein von der Pressstation aufgebracht werden, sondern wird durch den Einsatz der vorgesehenen Dehnerstationen (siehe unten) aufgeteilt.

Deshalb wird die maximal zu erwartende Druckkraft deutlich unter dem oben genannten Wert liegen. Im vorliegenden Fall ist eine Pressstation der Fa. *Herrenknecht AG* mit einer maximalen Druckkraft von 7.500 kN vorgesehen.

Zugkraft

Die erforderliche Zugkraft während des Einziehvorgangs der Produktleitung setzt sich auch beim Easy Pipe-Verfahren (analog dem PPT-Verfahren) im Wesentlichen aus den zwei Einzelkomponenten

- Reibung zwischen Rohroberfläche und Bohrspülung (F_1) sowie
- Reibung zwischen Rohroberfläche und Bohrlochwand (F_2)

zusammen und kann wie in Abschnitt 4.2.1 berechnet werden.

Vor dem Hintergrund der oben dimensionierten Press- und Dehnerstation mit maximal 7.500 kN Zugkraft ergeben sich somit auch beim Easy Pipe-Verfahren Einschränkungen bei der Verlegeleistung (Abb. 5-7).

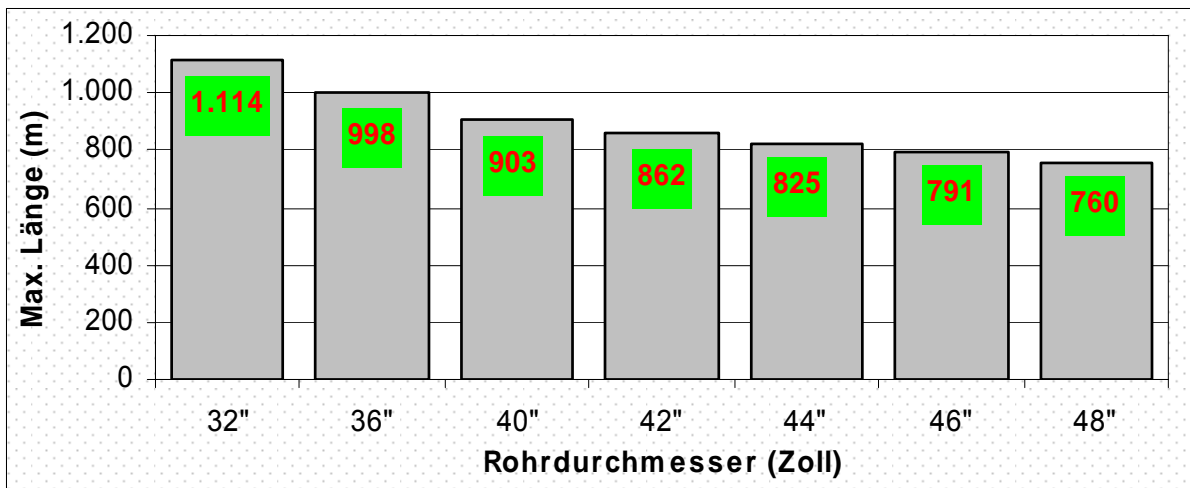


Abb. 5-7: Mittels Easy Pipe theoretisch erreichbare Verlegelängen in Abhängigkeit vom Rohrdurchmesser.

Zur Erreichung der oben dargestellten Verlegelängen muss unterstellt werden, dass auch die kleineren Rohrdurchmesser die maximale Zugkraft der Pressstation, auch unter Berücksichtigung der aus den Bohrlochradialen resultierenden Materialbelastungen (Biegespannungen), aufnehmen können. Dies muss ggf. durch eine entsprechend dimensionierte Wandstärke sichergestellt werden.

Durch den Einsatz eines Pipe Thrusters können allerdings auch beim Easy Pipe-Verfahren die erreichbaren Verlegelängen auf Werte zwischen 1.267 m (48") und 1.610 m (32") deutlich erhöht werden (Abb. 5-8).

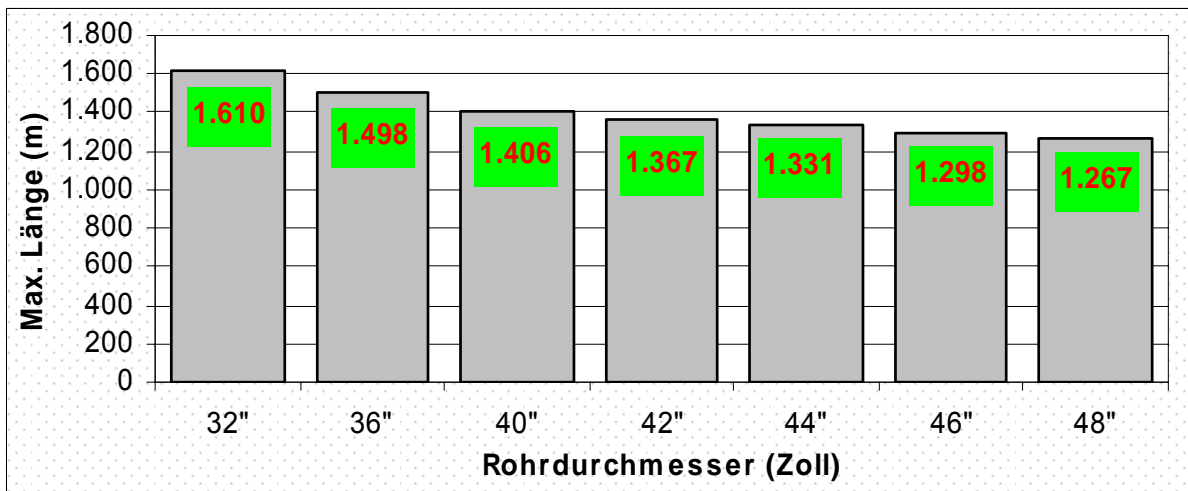


Abb. 5-8: Mittels Easy Pipe theoretisch erreichbare Verlegelängen in Abhängigkeit vom Rohrdurchmesser bei Einsatz eines Pipe Thrusters mit maximal 5.000 kN Druckkraft.

Micromaschine (Bohrkopf)

Hinsichtlich der Micromaschine erscheint es in dieser ersten Entwicklungsphase sinnvoll, zunächst einen bewährten Bohrkopf vorzusehen, bei dem gegebenenfalls auch die Werkzeuge am Schneidrad gewechselt werden können. Hierzu ist ein Minstdurchmesser erforderlich, um Personen einen sicheren Zugang zum Schneidrad zu ermöglichen.

Aus diesem Grund wird eine *Herrenknecht AVN 1200 TC* (Abb. 5-9) vorgesehen. Zusätzlich ist geplant, die hydraulische Lösearbeit durch einen verstärkten Einsatz von Spüldüsen zu verbessern und damit wiederum die Standzeit der mechanischen Lösewerkzeuge zu erhöhen. Entsprechende, technische Lösungsansätze liegen bereits bei der Fa. *Herrenknecht AG* vor.

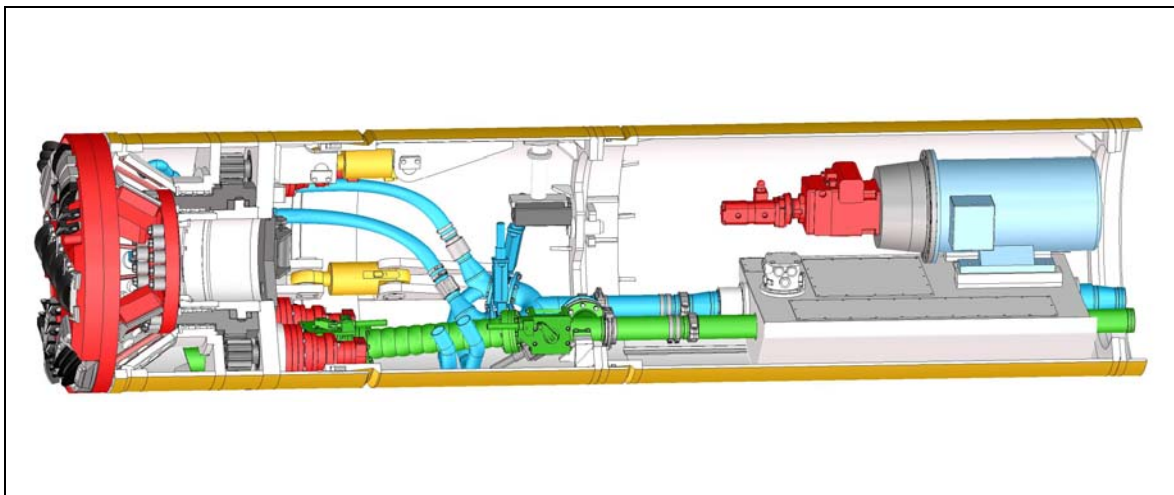


Abb. 5-9: Aufbau einer geeigneten Micromaschine [5-3].

Die wesentlichen maschinentechnischen Parameter dieser Einheit sind:

Installierte Leistung: 132 kW

Max. Drehmoment des Schneidrads: 258 kNm

Drehzahl (Links und Rechtslauf): stufenlos von 0 bis 5 Umdreh. / Minute

Betriebscontainer

Der Betriebscontainer umfasst neben der Erzeugung der hydraulischen Energie den Steuerstand zum Betrieb der Micromaschine sowie der Pressstation und der Dehnerstationen (Abb. 5-10).



Abb. 5-10: Betriebscontainer mit Steuerstand [5-6].

Im Allgemeinen werden die hydraulischen Pumpen von Elektromotoren angetrieben. Diese Variante setzt entweder einen geeigneten Netzanschluss oder entsprechend dimensionierte Generatoren voraus. Denkbar ist jedoch insbesondere für entlegene Bohrlokationen auch eine dieselhydraulische Energieumwandlung.

Vermessungssystem

Da die für das Easy Pipe-Verfahren geforderte Vermessungsgenauigkeit wesentlich geringer ist als z.B. bei der Verlegung von Freigefälleleitungen für die Abwasserentsorgung (Neigung muss über lange Strecken mitunter im Promillebereich eingehalten werden), kann eine Kombination aus Nordsuchendem Kreisel (Azimutbestimmung), elektronischer Schlauchwaage (Tiefenlage), Inklinometer (Neigung des Bohrkopfes) sowie elektronischem Messrad (abgebohrte Länge) eingesetzt werden (Abb. 5-11).

Mit dieser Messkombination ist eine relativ schnelle Vermessung der aktuellen Position des Bohrkopfes bei hinreichender Genauigkeit gegeben und ohne Personaleinsatz im Vortriebsrohr möglich. Seitens der Fa. *Herrenknecht AG* wurde als Richtwert für den Einsatz beim Easy Pipe-Verfahren eine maximale Abweichung von ca. 0,50 m bei einer Bohrstrecke von 500 m genannt (sowohl vertikal als auch horizontal).

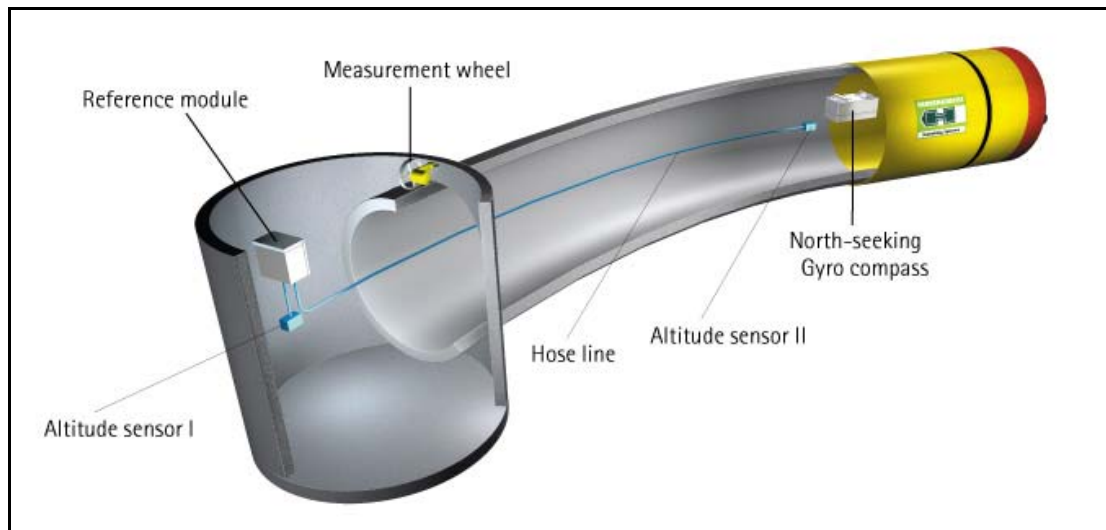


Abb. 5-11: Geeignetes Vermessungssystem für das Easy Pipe-Verfahren [5-7].

Bohrspülmischanlage

Die Bohrspülmischanlage entspricht in Aufbau, Funktion und Leistung den entsprechenden MT-Anlagen (siehe hierzu auch Abschnitt 2.2).

Bohrspülaufbereitungsanlage

Auch die Bohrspülaufbereitungsanlage entspricht in Aufbau, Funktion und Leistung den entsprechenden MT-Anlagen (siehe hierzu auch Abschnitt 2.2).

Förder- und Speisepumpen

Die Förder- und Speisepumpen entsprechen ebenfalls denjenigen in konventionellen MT-Anwendungen. Als Besonderheit ist für zukünftige Optimierungsvorgänge die erhöhte hydraulische Lösearbeit am Schneidrad zu erwähnen, die eine Positionierung entsprechend dimensionierte Booster-Pumpen hinter dem Schneidrad erfordert. Mit Hilfe dieser Booster-Pumpen ist eine Druckerhöhung der zugelieferten Bohrspülung auf > 10 bar möglich. In dieser Konstellation kann auf die empfindlichen Kolbenpumpen verzichtet werden

Wie beim konventionellen MT-Vorgang, müssen beim Easy Pipe-Verfahren Förderpumpen in den Vortriebsrohren vorgesehen werden. Aufgrund des gegenüber den MT-Anwendungen größeren Höhenunterschieds muss deren Anzahl erhöht werden.

Bentonit-Schmiersystem

Das Bentonit-Schmiersystem wird ebenfalls in Aufbau, Funktion und Dimensionierung demjenigen des konventionellen Rohrvortriebs entsprechen. Lediglich die Durchlässe in den Vortriebsrohren (Düsen) sind den veränderten geometrischen (Wanddicke) und materialspezifischen (Stahl) Gegebenheiten anzupassen.

Vortriebsrohre

Die zugfesten Vortriebsrohre sind ein wesentliches maschinentechnisches Element des Easy Pipe-Verfahrens. Im aktuellen Layout (Stand. Juli 2006) ist vorgesehen, diese Rohre aus Stahl zu fertigen und über hochfeste Zugstangen miteinander zu verbinden (Abb. 5-12).

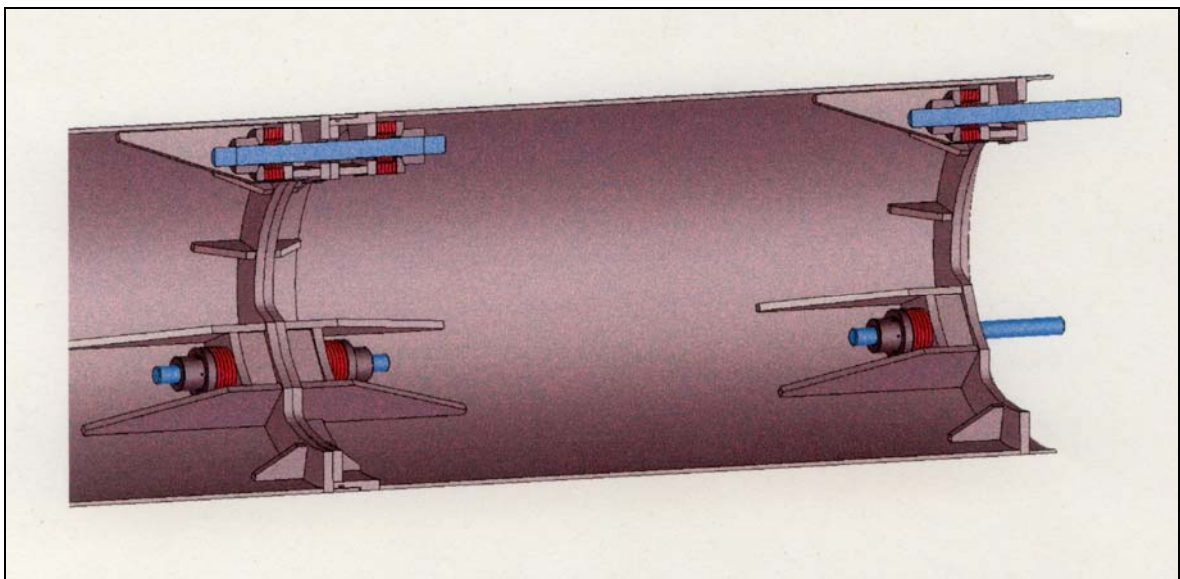


Abb. 5-12: Prinzipieller Aufbau und Anordnung der Verbindungselemente der zug- und druckfesten Vortriebsrohre [5-8].

Für das weitere Vorgehen bei der Entwicklung und Optimierung der Vortriebsrohre sollten neben den rein funktionalen Gesichtspunkten auch die wirtschaftlichen Aspekte sowie die einfache Transportierbarkeit der Rohre beachtet werden. In

diesem Prozess sind insbesondere das Rohrmaterial und die Abmessungen (Länge) von Wichtigkeit.

Alternative Werkstoffe zu dem bisher favorisierten Stahl könnten beispielsweise glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK) oder Polypropylen (PP) sein.

GFK (UP-GF) weist hohe mechanische Festigkeiten auf (Druckspannung 90 N/mm², Zugspannung 50 bis 500 N/mm²) und wird bereits heute als Vortriebsrohr mit Außendurchmessern zwischen 272 mm und 2.740 mm hergestellt [5-9]. Für den hier relevanten Außendurchmesser von ca. 1.400 mm lassen diese Rohre bei 3,5-facher Sicherheit bereits maximale Vortriebskräfte von fast 4.000 kN zu [5-4, 5-12].

PP-Vortriebsrohre werden gegenwärtig bereits mit zugkraftschlüssigen Verbindungen geliefert, allerdings bisher nur im Durchmesserbereich von 110 mm bis 560 mm. Der größte der genannten Rohrdurchmesser lässt dabei maximale Druckkräfte von ca. 1.650 kN und maximale Zugkräfte von ca. 585 kN zu [5-10]. Für den erdverlegten Rohrleitungsbau werden diese Rohre bis zu einer Nennweite (Innendurchmesser) von 1.600 mm und einer maximalen Wanddicke von 75,4 mm geliefert. Bei Zugfestigkeiten von mindestens 30 N/mm² ergäbe dies für den hier interessierenden Durchmesserbereich übertragbare Zugkräfte in Höhe von ca. 8.300 kN [5-11, 5-12].

Hinsichtlich der einfachen und effektiven Transportierbarkeit ist darauf zu achten, dass die spezifischen Gewichte der Vortriebsrohre (kg/m) möglichst niedrig sind und die Einzellängen möglichst günstige Transportabmessungen aufweisen.

Um eine maximale Vortriebskraft von 7.000 kN bei 1,5-facher Sicherheit übertragen zu können, sind bei einem vorgegebenen Außendurchmesser entsprechend unterschiedliche Wanddicken erforderlich, welche wiederum unterschiedliche, spezifische Rohrgewichte bedingen (Tab. 5-1).

Als günstiges Transportmaß ist eine Länge von z.B. 2,50 m zu untersuchen, da diese Einzellänge der standardisierten Ladebreite von Lastkraftwagen entspricht und somit einen problemlosen, weltweiten Transport ermöglicht. Bei entsprechend niedrigen Einzelgewichten könnten somit bis zu 15 Vortriebsrohre zu jeweils 2,50 m (= 37,5 m Gesamtlänge) transportiert werden.

Tab. 5-1: Materialvergleich von Stahl, GFK und PP für die Verwendung in Vortriebsrohren mit dem Außendurchmesser 1.400 mm und einer maximalen Axialkraft von 7.000 kN bei 1,5-facher Sicherheit [5-4, 5-9].

Parameter	Stahl	GFK	PP
Wichte [kN/m ³]	77,0	20,0	9,1
Festigkeit [N/mm ²]	360	250	30
Wanddicke [mm]	6,7	9,6	84,7
Gewicht (kg/m)	228,9	85,6	324,7

Vorteilhaft wirkt sich bei den Materialien GFK und PP zudem ihre relativ glatte Oberfläche aus, was gegenüber unbehandeltem Stahl zu geringeren Reibungskräften während des Vortriebs führen könnte.

Dehnerstationen

Die Dehnerstationen beim Easy Pipe-Verfahren erfüllen grundsätzlich die gleichen Aufgaben wie beim konventionellen MT-Verfahren, sind jedoch wie die Vortriebsrohre bi-funktional, d.h. sie können sowohl für den Druck- als auch den Zugbetrieb eingesetzt werden. Auch für dieses Bauteil sind die entsprechenden Konstruktionsarbeiten bei der Fa. *Herrenknecht AG* abgeschlossen.

Verbindungsrohr

Das Verbindungsrohr ist vorgesehen, um nach Abschluss der Bohrphase die Vortriebsrohre mit dem Produktrohrstrang zu verbinden. Hierzu wird dieses Bauteil auf der einen Seite (Richtung Bohrloch) mit der Bolzenverbindung der Vortriebsrohre befestigt und auf der anderen Seite (Richtung Rohrstrang) über eine Schweißverbindung gekoppelt.

Um Torsionsspannungen während des Einziehvorgangs zu eliminieren, kann zusätzlich ein geeignet dimensionierter Drehwirbel (Swivel) zwischen Verbindungsrohr und Produktrohrstrang angebracht bzw. baulich in das Verbindungsrohr integriert werden.

Zur Minderung der Reibung während des Einziehvorgangs sind im Verbindungsrohr Düsen mit relativ großem Durchmesser vorgesehen, aus denen eine durch die Speiseleitung verpumpte Bohrflüssigkeit in den zwischen Produktrohrstrang und Bohrlochwand entstehenden Raum gepumpt wird. Dadurch wird die Stabilität des Bohrlochs erhöht und die entstehende Reibung vermindert.

5.2.2 Infrastruktur

Die beim PPT-Verfahren behandelten Elemente der Infrastruktur

- Widerlager und
- Spülungsbecken

sollen auch für das Easy Pipe-Verfahren kurz kommentiert werden.

Eintrittsgrube mit Widerlager

Die vorzusehenden Widerlager müssen die maximal während des Verlegevorgangs auftretenden Horizontalkräfte sicher aufnehmen können. Gemäß den bisherigen Ausführungen wird als geeignete Pressstation eine Einheit mit maximal ca. 7.500 kN Druck- und Zugkraft sowie (optional) eine Thruster Unit mit maximal 5.000 kN Schub- bzw. Zugkraft vorgesehen.

Demzufolge muss das Widerlager an der Rigsite Kräfte von bis zu 7.500 kN und an der Pipesite bis zu 5.000 kN sicher aufnehmen können, auch wenn für den praktischen Einsatz die Kombination dieser Kräfte nur in Ausnahmesituationen erwartet wird.



Abb. 5-13: Beispiel eines Widerlagers bei einem konventionellen Rohrvortrieb [5-6].

Spülungsbecken

Da das Spülvolumen (Umlaufvolumen) beim Easy Pipe-Verfahren wesentlich geringer ist als z.B. beim HDD-Verfahren, sind keine separaten Spülungsgruben erforderlich. Da auch beim Rohreinzug keine Bohrspülung verdrängt wird, sondern im Gegenteil Bohrspülung ins Bohrloch verpumpt wird und dort verbleibt, ist keine Entsorgung von Bohrspülung nach Abschluss der Verlegearbeiten erforderlich.

5.3 Wirtschaftliche Aspekte

Auch für das Easy Pipe-Verfahren gilt ähnlich wie beim PPT-Verfahren der Hinweis, dass für eine präzise Kostenschätzung noch weitere Detailinformationen (z.B. exakte Höhe der erforderliche Investitionen etc.) und Leistungsparameter (Bohrgeschwindigkeiten in unterschiedlichen Böden etc.) erforderlich sind.

Erste Grobkostenschätzungen ergeben eine Investitionshöhe für ein komplettes Easy Pipe-System von etwa 4 Mio. Euro (Tab. 5-2). Die Tageskosten für einen 24-stündigen Einsatz werden in Europa, basierend auf Angaben des Herstellers sowie potentieller Anwender, auf ca. 30.000 Euro veranschlagt.

Tab. 5-2: Kostenschätzung für Easy Pipe-System [5-13].

Bauteil	Kosten (€)
Presstation	300.000
Micromaschine (Bohrkopf)	650.000
Betriebscontainer	400.000
Vermessungssystem	150.000
Bohrspülmischanlage (inkl. Speiseleitungen)	200.000
Bohrspülsaufbereitungsanlage (inkl. Förderleitungen)	300.000
Förder- und Speisepumpen	100.000
Bentonit-Schmiersystem	200.000
Vortriebsrohre	1.400.000
Dehnerstationen	250.000
Verbindungsrohr	15.000
Sonstige Kleinteile	35.000
SUMME	4.000.000

Zusammen mit den erwarteten Bohrleistungen (Tab. 5-3) können somit projektspezifische Kostenschätzungen vorgenommen werden. Hierbei müssen

jedoch die jeweiligen Nebenarbeiten wie Baustelleneinrichtung (Transporte, Kräne etc.), Geländevorbereitung (Baugruben etc.), Rohrbauarbeiten (z.B. Art und Kosten der Umhüllung) projektspezifisch betrachtet werden.

Tab. 5-3: Richtwerte für die Bohrleistung des Easy Pipe-Systems in unterschiedlichen Böden bei 24 Arbeitsstunden pro Tag [5-4, 5-14, 5-15, 5-16].

Baugrund	Bohrleistung in (m) pro Tag
Ton	12 bis 18 (Ø 15)
Schluff, Sand, Kies	15 bis 25 (Ø 20)
Fels	7 bis 13 (Ø 10)

Hinsichtlich der erforderlichen Transporte kann eine Abschätzung für das Easy Pipe-System ohne Vortriebsrohre durchgeführt werden (Tab. 5-4). Die für den Transport der Vortriebsrohre erforderliche LKW-Anzahl richtet sich nach der jeweiligen Bohrungslänge. Nach heutiger Auslegung (Abmessungen, Gewichte) können pro LKW (normaler Sattelzug ohne Sondergenehmigungen) zehn Vortriebsrohre und damit entsprechend 25 m Vortriebslänge transportiert werden. Dies bedeutet, dass für eine 600 m lange Bohrung 24 LKW-Ladungen veranschlagt werden müssen.

Tab. 5-4: Abschätzung der erforderlichen LKW-Transporte beim Einsatz des Easy Pipe-Verfahrens (ohne Vortriebsrohre).

Bauteil	Transporte
Presstation + Verbindungsrohr	1
Micromaschine (Bohrkopf)	1
Betriebscontainer	1
Bohrspülmischanlage (inkl. Speiseleitungen)	1
Bohrspülsaufbereitungsanlage (inkl. Förderleitungen)	1
Förder- und Speisepumpen	1
Bentonit-Schmiersystem	1
Dehnerstationen	1
Sonstige Kleinteile	2
SUMME	10

Eine generelle Positionierung der Easy Pipe-Kosten (z.B. zwischen HDD und MT) ist jedoch aus heutiger Sicht aufgrund zu vieler Imponderabilien noch nicht möglich.

5.4 Verfahrensbewertung

Auch für das Easy Pipe-Verfahren wird nachfolgend untersucht und bewertet, inwiefern die konkreten Zielvorgaben für die Neuentwicklung eines Verfahrens zur grabenlosen Rohrverlegung hinsichtlich

- der geometrische Leistungsgrenzen,
- der Aspekte des Baugrunds,
- der einsetzbare Rohrmaterialien sowie
- der wirtschaftliche Aspekte

erfüllt werden. Anschließend werden diese Einschätzungen als Zwischenergebnis zusammengefasst.

Geometrische Leistungsgrenzen

Der aus heutiger Sicht abschätzbare Verlegebereich des Easy Pipe-Verfahrens umfasst die in Abb. 5-14 dargestellten Dimensionen. Es ist zu erkennen, dass das Easy Pipe-Verfahren bei den kleineren Durchmessern (DN 800 und DN 900) die Vorgaben erreichen kann und bei den größeren Durchmessern die Vorgaben zu 75 bis 90% erfüllt.

Zusätzlich besteht die Option, durch den Einsatz eines Pipe Thrusters diese Verlegeleistungen weiter zu steigern, so dass festgehalten werden kann, dass die angestrebten Verlegeleistungen vom Easy Pipe-Verfahren zumindest teilweise erbracht werden können.

1200															
1100															
1000															
900															
800															
Produktrohr-Ø (mm)	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800	850	900	950	1000
Rohrlänge (m)															

Abb. 5-14: Darstellung der abgeschätzten geometrischen Leistungsgrenzen des Easy Pipe-Verfahrens ohne Einsatz eines zusätzlichen Pipe Thrusters (gerundete Werte) im Vergleich zu den Zielvorgaben (grün umrandeter Bereich).

Aspekte des Baugrunds

Die Einschätzungen hinsichtlich der Bewältigung des relevanten Baugrunds (Sand, Kies, Steine) durch das Easy Pipe-Verfahren entsprechen denjenigen des

PPT-Verfahrens und werden durch die gleichen Argumente begründet. Somit kann festgestellt werden, dass das verfahrensspezifische Baugrundrisiko beim Easy Pipe-Verfahren geringer als beim HDD-Verfahren, jedoch höher als beim MT-Verfahren einzuschätzen ist.





Wirtschaftliche Bewertung

Eine belastbare Bewertung der wirtschaftlichen Aspekte kann erst dann abschließend durchgeführt werden, wenn eine ausreichende Anzahl an Projekten mittels Easy Pipe realisiert und die dabei entstandene Kostenstruktur sorgfältig analysiert wurde.

Zwischenergebnis zum Easy Pipe-Verfahren

Die Erfüllung der gestellten Zielvorgaben durch das Easy Pipe-Verfahren kann aus heutiger Sicht gemäß den Bewertungen in Tab. 5-5 eingeschätzt werden.

Tab. 5-5: Wesentliche Zielvorgaben für ein neues Verlegeverfahren sowie Angaben dazu, inwiefern diese Vorgaben durch das EP-Verfahren erfüllt werden können.

	= Zielvorgabe erfüllt		= Zielvorgabe nicht erfüllt
	= Zielvorgabe nur teilweise erfüllt		= Keine Bewertung möglich

Kriterium	Zielvorgabe	Easy Pipe
Rohrdimensionen	D = 800 - 1200 mm, L = 500 - 1.000 m	Im Wesentlichen werden die Vorgaben erreicht
Aspekte des Baugrunds	Sandiger Kies mit Steinen (bis 300 mm)	Sehr wahrscheinlich möglich
Geeignete Rohrmaterialien	Stahl	Uneingeschränkt möglich
Wirtschaftliche Aspekte	Wenn möglich < MT-Kosten	Zur Zeit keine Einschätzung möglich

Es kann somit festgehalten werden, dass das Easy Pipe-Verfahren die gestellten Zielvorgaben größtenteils erfüllt. Lediglich hinsichtlich der Reichweite sind bei den größeren Durchmessern Einschränkungen vorzunehmen, die aber bei einer zukünftigen Verfahrensoptimierung durch den Einsatz eines Pipe Thrusters ggf. behoben werden können.

5.5 Ausblick

Nach Publikation des Verfahrens im Dezember 2005 [5-1] entstand augenblicklich ein großes Interesse an dieser neuen Bauweise. Innerhalb weniger Wochen wurden an den Verfasser bzw. an die, an der weiteren Entwicklung beteiligte Fa. *Herrenknecht AG*, zahlreiche Projektanfragen aus Australien, Deutschland, Großbritannien, Indien, Italien und Russland gestellt. Für die meisten dieser Projekte wurden bereits konkrete Preisangebote erstellt. Der Großteil der Anfragen war ursprünglich als HDD-Projekt geplant. Aufgrund der ungünstigen Baugrundbedingungen (Kies, Steine, Schotter) wurde nach technischen Alternativlösungen gesucht, die insbesondere dass mit der Realisierung abschätzbare Baurisiko verringern sollten.

Es wird zum heutigen Zeitpunkt (Juli 2006) damit gerechnet, dass noch im Jahr 2006 bzw. Anfang des Jahres 2007 die ersten Pipelines mittels Easy Pipe-Verfahren verlegt werden können.

Neben dem Einsatz des Verfahrens in der Pipelineindustrie wurde parallel eine potentielle Anwendung im Bereich der Exploration und Förderung von Rohstoffen (insbesondere von Diamanten) durchgeführt (Abb. 5-15). Auch hier gab es bereits erste, konkrete Anfragen aus Angola, Botswana, Kanada und Südafrika.

Die diesbezüglichen Studien und Untersuchungen unterliegen allerdings einer Geheimhaltungsvereinbarung und können deshalb an dieser Stelle nicht näher ausgeführt werden.

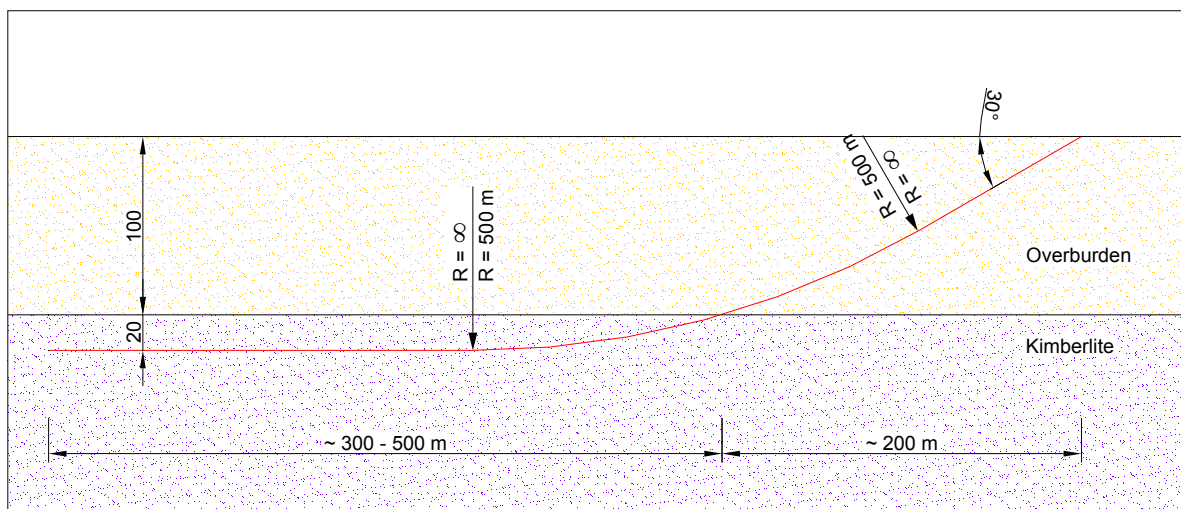


Abb. 5-15: Prinzipielle Darstellung eines Bohrprofils im EP-Verfahren bei der Exploration auf Diamanten (Einsatz von der Geländeoberfläche).

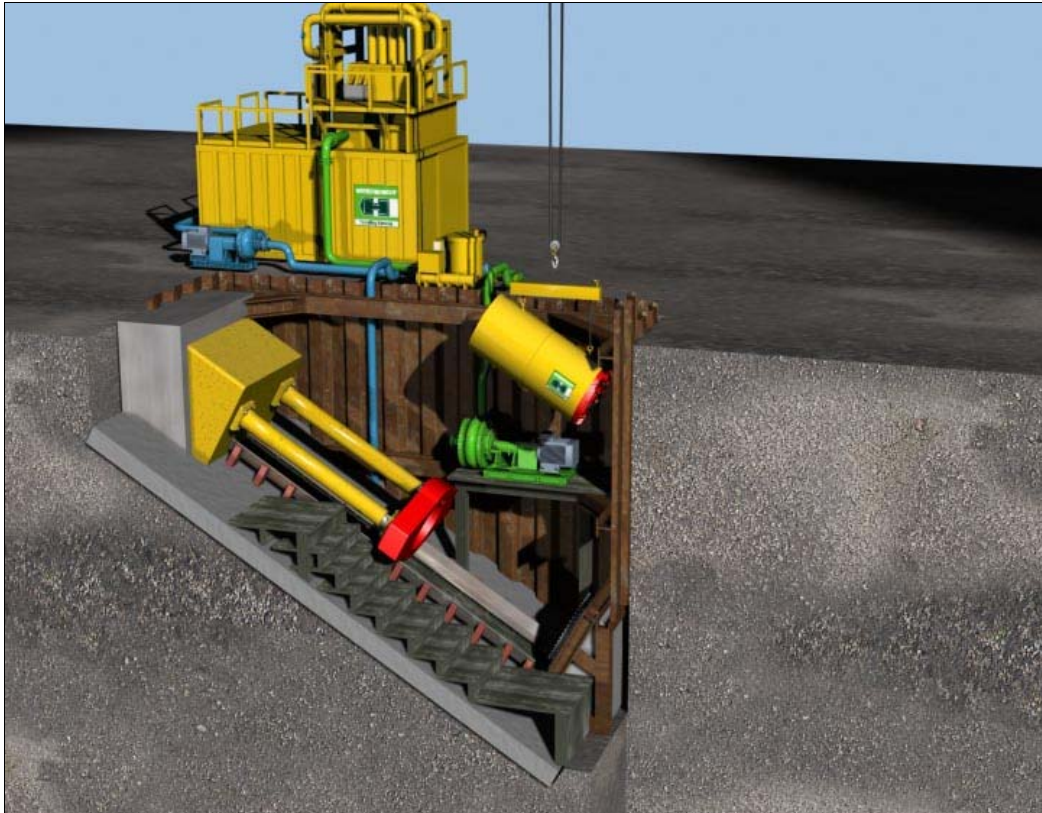


Abb. 5-16: Prinzipielle Darstellung einer Startbaugrube für das EP-Verfahren bei der Exploration auf Diamanten (Einsatz von der Geländeoberfläche).

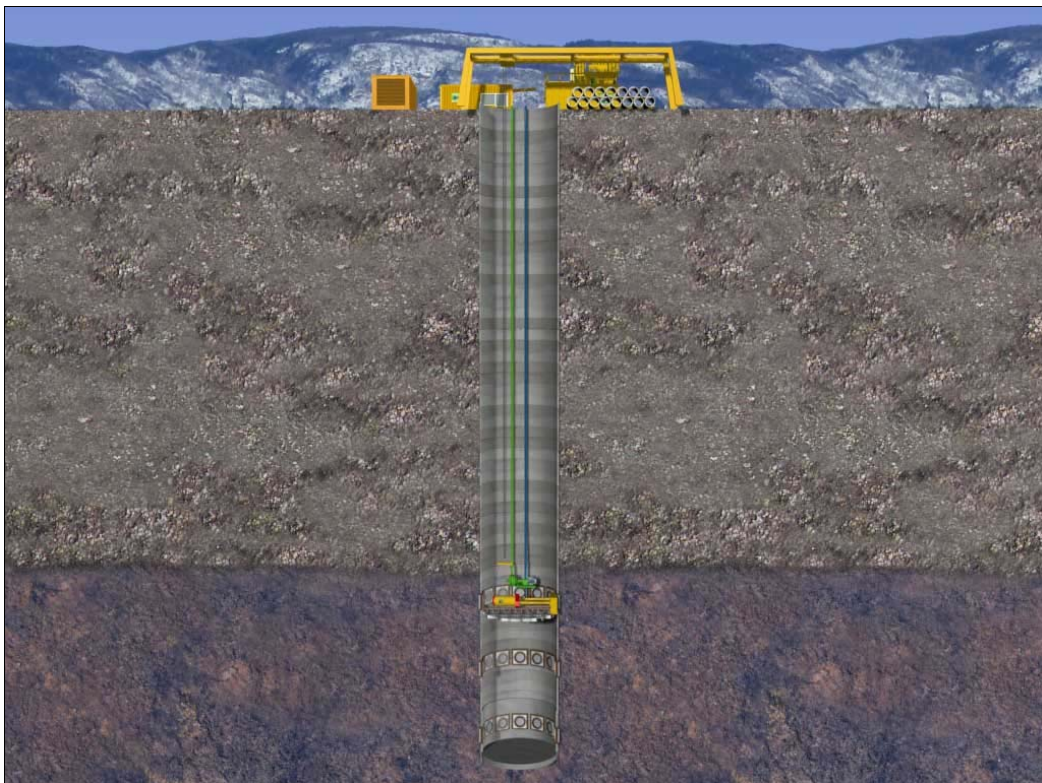


Abb. 5-17: Möglicher Einsatz des Easy Pipe-Verfahrens bei der Exploration auf Diamanten (Einsatz aus einem Schacht heraus).

In jedem Fall kann das Potential dieser neuen Verlegetechnik als groß eingeschätzt werden. Für die weitere Entwicklung ist es dabei außerordentlich wichtig, möglichst zeitnah konkrete Projekte durchzuführen und damit die viel versprechenden theoretischen Überlegungen und Ansätze zu diesem Verfahren zu verifizieren.

6 Zusammenfassung

Die Verlegung von Rohrleitungen für den Transport von Öl und Gas über große Entfernungen gewinnt zunehmend an strategischer und öffentlicher Bedeutung. Während der Bauphase der Pipelines stehen die Betreiberfirmen dabei insbesondere im Hinblick auf ökologische Aspekte im Fokus der Öffentlichkeit, während in der späteren Betriebsphase die Sicherheit der Rohrleitungssysteme vor Beschädigungen oder Sabotage die größte Rolle spielt.

Beide Aspekte (Umwelt und Sicherheit) kommen ganz besonders dort zum Tragen, wo die Rohrleitungen in sensiblen Abschnitten verlegt werden müssen. In diesen Bereichen haben sich in der Vergangenheit die grabenlosen Rohrverlegetechniken wie die gesteuerte Horizontalbohrtechnik (HDD = Horizontal Directional Drilling) und der gesteuerte Rohrvortrieb (Microtunneling oder Pipe Jacking) bewährt.

Diese beiden etablierten Verlegetechniken haben jeweils spezifische Vor- und Nachteile. Während die HDD-Technik eine sehr schnelle und wirtschaftliche Verlegemethode ist, zeichnet sich das Microtunneling durch ein, auch in schwierigen Bodenformationen, relativ geringes Baurisiko aus.

Um die jeweiligen Vorteile beider Verfahren zu kombinieren ohne gleichzeitig deren spezifische Nachteile übernehmen zu müssen, wurden in der Vergangenheit bereits zahlreiche Versuche unternommen, ohne dabei jedoch eine betriebssichere und effiziente neue Verlegemethode entwickeln zu können.

In Zusammenarbeit mit der Fa. *Herrenknecht AG* aus Schwanau-Allmannsweier, einem weltweit renommierten Hersteller von Bohr- und Tunnelequipment, wurde ein weiteres Verfahren konzipiert und getestet.

Diese als PPT-Verfahren (Push&Pull-Technology) bekannt gewordene Bauweise basiert hauptsächlich auf der HDD-Technik. Zunächst wird eine Pilotbohrung durchgeführt. Anschließend werden die Aufweitgänge und der Einziehvorgang zu einem einzigen Verfahrensschritt zusammengelegt. Als Bohrkopf kommt eine modifizierte Microtunnelmaschine zum Einsatz, die über das Bohrgestänge von der HDD-Bohranlage angetrieben und gezogen wird. Der einzuziehende Rohrstrang wird kraftschlüssig mit dem Bohrkopf verbunden und folgt dem Bohrkopf auf seinem Weg durchs Bohrloch.

Das PPT-Verfahren war insbesondere für den Einsatz in kiesigen und steinigen Böden ausgelegt, da mit dieser Bauweise wegen des im Bohrkopf integrierten Brechers genau diese Bodenformationen beherrscht werden können. Darüber hinaus sind Bohrlocheinstürze wegen der permanent im Bohrloch befindlichen Rohrtour, anders als beim HDD-Verfahren, ausgeschlossen.

Bei ersten Praxistests auf dem Werksgelände in Schwanau zeigten sich allerdings verfahrensbedingte und maschinentechnische Defizite. Insbesondere der Bohrkleintransport vom Brecher durch das Produktrohr zur Aufbereitungsanlage sowie die hohen Scherkräfte am Übergang zwischen Bohrgestänge und Schneidrad konnten während der Versuche nicht beherrscht werden. Für diese und weitere Aspekte wurden im Rahmen dieser Arbeit entsprechende Optimierungsvorschläge erarbeitet.

Als ein positives Ergebnis der PPT-Entwicklung ist der so genannte Pipe Thruster zu sehen. Hierbei handelt es sich um eine Maschine, die die grabenlose Verlegung großer Rohrleitungen durch enorme Vorschubkräfte unterstützen soll und auch bei konventionellen HDD-Projekten zum Einsatz gelangen wird. Die erste dieser vollhydraulischen Einheiten wurde Anfang 2006 von der *Herrenknecht AG* erstellt. Sie wird voraussichtlich erstmalig bei einem Projekt in Indien Ende 2006 / Anfang 2007 eingesetzt.

Basierend auf den Erkenntnissen, die im Zuge der PPT-Entwicklung gewonnen werden konnten, wurde im Jahr 2005 eine weitere grabenlose Rohrverlegetechnik konzipiert, die unter dem Namen Easy Pipe (EP) wiederum Vorteile des HDD- und MT-Verfahrens zu kombinieren versucht.

Im Gegensatz zum PPT orientiert sich Easy Pipe wesentlich stärker an der MT-Technik als am HDD. In einem ersten Arbeitsschritt wird ein konventioneller Rohrvortrieb von einem Start- zu einem Zielpunkt durchgeführt (mit gewissen Optimierungen hinsichtlich des Schneidrads etc.). Im zweiten Arbeitsschritt wird der Bohrkopf, eine im Wesentlichen konventionelle AVN-Maschine, vom Vortriebsrohrstrang entfernt. Stattdessen werden die Vortriebsrohre über ein Verbindungsstück mit der (wie beim HDD-Verfahren) in einem Stück vorgefertigten Rohrleitung verbunden. Anschließend wird die Rohrleitung durch das Zurückziehen der Vortriebsrohre in das Bohrloch eingebracht.

Die Vorteile dieses neuen Verfahrens sind neben der sicheren Beherrschung schwieriger Bodenformationen und dem sicheren Vermeiden von Bohrlocheinstürzen (= technische Vorteile) auch das Einsparen einer permanenten Schutzrohrtour, wie sie beim MT-Verfahren erforderlich ist (= wirtschaftlicher Vorteil). Im Ergebnis können mittels des EP-Verfahrens große Stahlrohrleitungen grabenlos in schwierigen Bodenbedingungen zu wirtschaftlich interessanten Konditionen verlegt werden.

Vereinfacht stellen sich die Leistungsprofile der konkurrierenden Bauweisen nunmehr wie folgt dar (Abb. 7-1):

Tab. 6-1: Leistungsprofile von HDD, MT und EP.

Verfahren	Baurisiko	Baukosten
HDD	hoch	niedrig
MT	niedrig	hoch
EP	mittel	mittel

Momentan wird der erste Einsatz von Easy Pipe geplant. Potentielle Projekte werden zur Zeit (Juli 2006) in Deutschland, Großbritannien, Italien und Indien diskutiert. Weitere Anfragen liegen bereits aus Australien und Russland vor.

Neben der Verwendung des Easy Pipe-Verfahrens in der Pipelineindustrie haben sich potentielle Einsatzgebiete im Bereich der Rohstofferkundung und –förderung ergeben. Im Rahmen mehrerer Machbarkeitsstudien wird zur Zeit der Einsatz von EP bei der Exploration auf Diamanten detailliert untersucht (sowohl für Seifenlagerstätten als auch in Kimberliten).

Zusammenfassend kann somit festgehalten werden, dass es mit dem Easy Pipe-Verfahren wohl gelungen ist, eine weitere Bauweise für die grabenlose Verlegung großer Stahlrohrleitungen zu entwickeln, die die Vorteile der etablierten Methoden HDD und MT vereint. Gleichzeitig konnte im Zuge der vorlaufenden Konzipierung des PPT-Verfahrens die Entwicklung des Pipe Thruster bei der Fa. *Herrenknecht AG* entscheidend vorangebracht werden. Sowohl für Easy Pipe als auch für den Pipe Thruster sind erste Einsätze eventuell schon im Jahr 2006 zu erwarten.

ANLAGEN

	Seite
Abbildungsverzeichnis	II
Tabellenverzeichnis	VIII
Literaturverzeichnis	I X

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Kapitel 1

- Abb. 1-1: Konventionelle Pipelineverlegung im offenen Rohrgraben [1-1].
- Abb. 1-2: Konventionelle Pipelineverlegung in schwierigem Gelände (Moorgebiet) [1-2].
- Abb. 1-3: Prinzipieller Baustellenaufbau beim HDD-Verfahren [1-4].
- Abb. 1-4: Prinzipieller Baustellenaufbau beim MT-Verfahren [1-3].

Kapitel 2

- Abb. 2-1: Einteilung der Verfahren der grabenlosen Rohrverlegung.
- Abb. 2-2: Wesentliche Elemente beim Einsatz des Microtunnelings [2-6].
- Abb. 2-3: Vorschubzylinder (maximale Vorschubkraft jeweils ca. 3.500 kN) in Startschacht während der Bohrarbeiten [2-8].
- Abb. 2-4: Schnitte durch Micromaschinen mit Naßförderung [2-6].
- Abb. 2-5: Steuerstand und Display der Vermessungseinheit in einer Microtunnelmaschine der Fa. *Herrenknecht AG*, Schwanau [2-11].
- Abb. 2-6: Laser-Vermessungssystem beim Microtunneling [2-12].
- Abb. 2-7: Typische Mischeinrichtung für Microtunneling Anwendung [2-13].
- Abb. 2-8: Größere Recyclinganlage im Baustelleneinsatz .
- Abb. 2-9: Typisches Layout einer Kreiselpumpe zur Förderung von Bohrspülung (mit und ohne Cuttings) [2-14].
- Abb. 2-10: Prinzipielle Anordnung der Systemkomponenten von Bentonit-Schmiersystemen beim Microtunneling [2-15].
- Abb. 2-11: Polycrète-Vortriebsrohre während der Verlegung [2-16].
- Abb. 2-12: Prinzipieller Einsatz von Dehnerstationen im Rohrstrang [2-15].
- Abb. 2-13: Wesentliche maschinentechnische Komponenten der grabenlosen Rohrverlegung mittels Microtunneling [2-6].
- Abb. 2-14: Spezieller Startschacht in Polygonform für grabenlose Rohrverlegung mittels Microtunneling [2-6].
- Abb. 2-15: Prinzipielle, vereinfachte Darstellung der Abhängigkeit von Rohrlänge (= Bohrungslänge) und Rohrdurchmesser beim Microtunneling bei der (nachträglichen) Verlegung von Stahlproduktrohren [2-18, 2-22].
- Abb. 2-16: Eignung unterschiedlicher Schneidräder für verschiedene Bodenklassen [2-17].

- Abb. 2-17: Prinzipielle, vereinfachte Darstellung der Einsatzbereiche des Microtunneling in Abhängigkeit vom Baugrund.
- Abb. 2-18: Einsetzbarkeit unterschiedlicher Rohrmaterialien für die Verlegung mittels Microtunneling.
- Abb. 2-19: Prinzipielle Darstellung der Pilotbohrung beim HDD-Verfahren [2-24].
- Abb. 2-20: Prinzipielle Darstellung der Aufweitbohrung beim HDD-Verfahren [2-24].
- Abb. 2-21: Prinzipielle Darstellung des Einziehvorgangs beim HDD-Verfahren [2-24].
- Abb. 2-22: 250-t Horizontalbohrgerät der Fa. *Herrenknecht AG* auf Sattelaufleger.
- Abb. 2-23: Power Pack mit ca. 1.000 kW installierter Leistung.
- Abb. 2-24: Arbeitsplatz einer 300-t Bohranlage.
- Abb. 2-25: Wesentliche Elemente eines Magnetic Guidance Systems (oben) sowie Position der Messsonde im Bohrstrang (unten) [2-28, 2-29].
- Abb. 2-26: Hochdruck-Spülpumpe mit dieselhydraulischem Antrieb ohne Schallschutz.
- Abb. 2-27: Bohrspülmischeinrichtung mit einer Mischkapazität von ca. 550 l/min [2-26].
- Abb. 2-28: Recyclinganlage zur Aufbereitung von Bohrspülung [2-27].
- Abb. 2-29: Bohrgestänge auf Bohrgestängelager mit Kran.
- Abb. 2-30: Einsatz eines Hole Openers im Festgestein (Brasilien, 2001).
- Abb. 2-31: Widerlager aus Spundwänden vor Maxi-Bohrgerät (2.000 kN).
- Abb. 2-32: Bohrspülungsbecken neben einer Horizontalbohranlage.
- Abb. 2-33: Spülrückleitung zur Bohranlage (rechts im Bild).
- Abb. 2-34: Prinzipielle, vereinfachte Darstellung der Abhängigkeit von Rohrlänge (= Bohrungslänge) und Rohrdurchmesser beim HDD [2-1, 2-22, 2-38, 2-39].
- Abb. 2-35: Prinzipielle, vereinfachte Darstellung der Einsatzbereiche des HDD in Abhängigkeit vom Baugrund.
- Abb. 2-36: Einsetzbarkeit unterschiedlicher Rohrmaterialien für die Verlegung mittels HDD.

Kapitel 3

- Abb. 3-1: Räumvorgang eines gescheiterten HDD-Projektes in steinig-kiesigem Baugrund.
- Abb. 3-2: Tagbruch während eines Räumvorgangs mit einem 52“-Räumer (Räumerdurchmesser = 1,32 m).
- Abb. 3-3: Bergeversuch einer festgezogenen 36“-Rohrleitung ($\varnothing = 914 \text{ mm}$).
- Abb. 3-4: Bergeversuch einer festgezogenen 44“-Rohrleitung ($\varnothing = 1.118 \text{ mm}$).

- Abb. 3-5: Beschädigung einer mittels HDD verlegten 44“-Stahlleitung aus hochfestem Stahl mit 17,2 mm Wandstärke.
- Abb. 3-6: Oben: Bohrungslängen von 79 untersuchten Referenzbohrungen im HDD-Verfahren (gelb = lineare Trendlinie)
Unten: Minimale, mittlere und maximale Verlegelängen der Referenzbohrungen in Abhängigkeit vom Rohrdurchmesser.
- Abb. 3-7: Darstellung des Zielbereichs der geometrischen Leistungsfähigkeit für das neu zu entwickelnde Verfahren (grün umrandet) vor dem Hintergrund der entsprechenden Bereiche des MT (oben) bzw. des HDD (unten).
- Abb. 3-8: Bindiger Baugrund (Mecklenburg-Vorpommern) mit Einlagerung größerer Einzelsteine (Steinklassen S1 und S3 sowie Blöcke).
- Abb. 3-9: Korngrößenbereiche nach DIN 4022 [3-6]
- Abb. 3-10: Beispielhafte Körnungsliniene nach DIN 18123 [3-7].

Kapitel 4

- Abb. 4-1: Pilotbohrung beim PPT-Verfahren (Prinzip).
- Abb. 4-2: Aufweiten und Einziehen (Prinzip).
- Abb. 4-3: Drehmomententwicklung beim PPT-Verfahren bei einem Schneidraddurchmesser von ca. 1,5 m.
- Abb. 4-4: Einsatz einer 4.000-kN Bohranlage (Mega-Rig) während eines konventionellen HDD-Projekts.
- Abb. 4-5: Beispielhafte Darstellung der Abhängigkeit von gleichzeitiger Zugkraft- und Drehmomentbelastung auf API-Bohrgestänge [4-14].
- Abb. 4-6: Mittels PPT theoretisch erreichbare Verlegelängen in Abhängigkeit vom Rohrdurchmesser.
- Abb. 4-7: Schnitt durch Entwurf für PPT-Maschine [4-27].
- Abb. 4-8: Montage der ersten PPT-Maschine in Schwanau.
- Abb. 4-9: Erster Entwurf eines Pipe Thrusters (Stand 2003) [4-27].
- Abb. 4-10: Überarbeiteter Entwurf des Pipe Thrusters (Stand 2004) [4-29].
- Abb. 4-11: Überarbeiteter Entwurf des Pipe Thrusters (Stand 2006) [4-29].
- Abb. 4-12: Arbeitsablauf bei der werkseitigen Umhüllung von Stahlrohren [8-13].
- Abb. 4-13: Versuchsstand der Fa. *Herrenknecht AG* für die Übertragung der Klemmkräfte.
- Abb. 4-14: Erster Pipe Thruster der Fa. *Herrenknecht AG* auf der Hannover Messe 2006.

- Abb. 4-15: Versuchsgelände für die PPT-Feldversuche in Schwanau-Allmannsweiler.
- Abb. 4-16: Prinzipieller Versuchsaufbau für die PPT-Feldversuche in Schwanau-Allmannsweiler.
- Abb. 4-17: Bohrgerät HK400M auf dem Versuchsgelände.
- Abb. 4-18: Bohrgestänge der PPT-Versuche.
- Abb. 4-19: Montage der angepassten PPT-Maschine vor Versuchsbeginn.
- Abb. 4-20: Montage des Rohrstrangs für die Versuche in Schwanau-Allmannsweiler.
- Abb. 4-21: Widerlager für die Horizontalbohranlage.
- Abb. 4-22: Rollenmeißel der Pilotbohrung.
- Abb. 4-23: Darstellung der Pilotbohrung.
- Abb. 4-24: Hohe Beanspruchung einzelner Bohrstangen während der Durchführung der Pilotbohrung.
- Abb. 4-25: Förder- und Versorgungsleitungen im Produktrohr.
- Abb. 4-26: Ende des Aufweitgangs zur Reduzierung der Bohrlochreibung.
- Abb. 4-27: Übergangsbereich zwischen Produktrohr und PPT-Maschine.
- Abb. 4-28: Montage der Hauptantriebswelle.
- Abb. 4-29: Test der Düsen im Brecherraum vor Montage des Schneidrads.
- Abb. 4-30: Ausrichtung des Rohrstrangs mit PPT-Maschine.
- Abb. 4-31: Ausgerichteter Rohrstrang mit PPT-Maschine und fertig verschraubtem Bohrgestänge.
- Abb. 4-32: Eintritt der PPT-Maschine in die Eintrittsgrube.
- Abb. 4-33: Position der PPT-Maschine unmittelbar nach dem vermuteten Gestängebruch.
- Abb. 4-34: Zurückgezogene PPT-Maschine mit Bruchstelle.
- Abb. 4-35: Gegenstück der Bruchstelle am Gestänge
- Abb. 4-36: Modifizierte PPT-Maschine mit mechanischer Verstärkung im Übergangsbereich Bohrgestänge/Schneidrad.
- Abb. 4-37: Betonwand mit Anfahrdichtung an der Stirnseite der Baugrube.
- Abb. 4-38: Endposition des Produktrohrs beim Abbruch der Versuche.
- Abb. 4-39: Sedimentiertes Bohrklein in Förderleitung vor Schieber.
- Abb. 4-40: Bruchstelle an der PPT-Maschine.
- Abb. 4-41: Montagebereich an der PPT-Maschine für das Verstärkungsstück (links) und montiertes Verstärkungsstück (rechts).
- Abb. 4-42: So genannte Pullback-Assembly für HDD-Bohrungen [4-15].
- Abb. 4-43: Details eines Drehwirbels [4-41, 4-42].

- Abb. 4-44: Durchmesserangaben und Abmessungen unterschiedlicher Drehwirbel [4-43]
- Abb. 4-45: Mögliche Anordnung von Gelenkverbindern (Steuerzylinder) hinter der PPT-Maschine.
- Abb. 4-46: Realisierbare Kurvengängigkeit mittels Gelenkverbinder hinter der PPT-Maschine.
- Abb. 4-47: Ausbläser über einer Bohrtrasse.
- Abb. 4-48: Vorgesehene Fließwege der Bohrspülung durch die PPT-Maschine.
- Abb. 4-49: Tatsächliche Fließwege der Bohrspülung durch die PPT-Maschine.
- Abb. 4-50: Prinzipielle Darstellung des Bauzustands 1.
- Abb. 4-51: Prinzipielle Darstellung des Bauzustands 2.
- Abb. 4-52: Druckverhältnisse beim PPT-Vortrieb für das untersuchte Anwendungsbeispiel.
- Abb. 4-53: Druckverhältnisse während des PPT-Versuchs (Anfahrbereich).
- Abb. 4-54: Slurry Pump oder Kreiselpumpe der mittleren Leistungsklasse [4-46].
- Abb. 4-55: Typischer Aufbau einer Medium Duty Slurry Pump [8-27].
- Abb. 4-56: Druck-Volumenstrom-Diagramm der XU-Baureihe der Fa. *Weir Warman Ltd.* [4-46].
- Abb. 4-57: Vorder- und Seitenansicht einer XU-Pumpe der Fa. *Weir Warman Ltd.* (ohne Antrieb) [4-46].
- Abb. 4-58: Prinzipieller Versuchsaufbau zur Untersuchung der hydro-pneumatischen Förderung in schrägen Förderleitungen in den Labors der TU Clausthal. [4-53].
- Abb. 4-59: Anordnung der Systemkomponenten zur Untersuchung der hydropneumatischen Förderung in den Labors der TU Clausthal. [4-53].
- Abb. 4-60: Grundsätzliche Druckverhältnisse beim Lufthebeverfahren [4-52].
- Abb. 4-61: Darstellung der abgeschätzten geometrischen Leistungsgrenzen des PPT-Verfahrens (gerundete Werte) im Vergleich zu den Zielvorgaben (grün umrandeter Bereich).

Kapitel 5

- Abb. 5-1: Erstellung der Bohrung beim EP-Verfahren (Prinzip).
- Abb. 5-2: Vorbereitung des Einziehvorgangs beim EP-Verfahren (Prinzip).
- Abb. 5-3: Einziehvorgang beim EP-Verfahren (Prinzip).
- Abb. 5-4: Einbindung der eingezogenen Rohrleitung beim EP-Verfahren (Prinzip).
- Abb. 5-5: Prinzipielle Funktion einer EP-Pressstation [5-2].
- Abb. 5-6: Pressstation beim Einsatz im konventionellen MT [5-1].
- Abb. 5-7: Mittels Easy Pipe theoretisch erreichbare Verlegelängen in Abhängigkeit vom Rohrdurchmesser.

- Abb. 5-8: Mittels Easy Pipe theoretisch erreichbare Verlegelängen in Abhängigkeit vom Rohrdurchmesser bei Einsatz eines Pipe Thrusters mit maximal 5.000 kN Druckkraft.
- Abb. 5-9: Aufbau einer geeigneten Micromaschine [5-3].
- Abb. 5-10: Betriebscontainer mit Steuerstand [5-6].
- Abb. 5-11: Geeignetes Vermessungssystem für das Easy Pipe-Verfahren [5-7].
- Abb. 5-12: Prinzipieller Aufbau und Anordnung der Verbindungselemente der zug- und druckfesten Vortriebsrohre [5-8].
- Abb. 5-13: Beispiel eines Widerlagers bei einem konventionellen Rohrvortrieb [5-6].
- Abb. 5-14: Darstellung der abgeschätzten geometrischen Leistungsgrenzen des Easy Pipe-Verfahrens ohne Einsatz eines zusätzlichen Pipe Thrusters (gerundete Werte) im Vergleich zu den Zielvorgaben (grün umrandeter Bereich).
- Abb. 5-15: Prinzipielle Darstellung eines Bohrprofils im EP-Verfahren bei der Exploration auf Diamanten (Einsatz von der Geländeoberfläche).
- Abb. 5-16: Prinzipielle Darstellung einer Startbaugrube für das EP-Verfahren bei der Exploration auf Diamanten (Einsatz von der Geländeoberfläche).
- Abb. 5-17: Möglicher Einsatz des Easy Pipe-Verfahrens bei der Exploration auf Diamanten (Einsatz aus einem Schacht heraus)

TABELLENVERZEICHNIS

Kapitel 2

Tab. 2-1: Gängige Unterscheidung der HDD-Bohrgerätegrößen (Rig = Bohrgerät).

Kapitel 3

Tab. 3-1: Wesentliche Zielvorgaben für ein neues Verlegeverfahren sowie Angaben dazu, inwiefern HDD und MT diese Vorgaben abdecken können.

Kapitel 4

Tab. 4-1: Förderdruck und Fließgeschwindigkeit von Bohrspülung (mit Cuttings) in Förderleitungen mit unterschiedlichen Innendurchmessern (Volumenstrom = 2.000 L/min, Förderlänge = 1.000 m).

Tab. 4-2: Förderdruck und Fließgeschwindigkeit von Bohrspülung (mit Cuttings) in einer Förderleitung mit 400 mm Innendurchmesser und einer Pumprate von 2.000 L/min bei unterschiedlichen Förderlängen.

Tab. 4-3: Wesentliche Zielvorgaben für ein neues Verlegeverfahren sowie Angaben dazu, inwiefern diese Vorgaben durch das PPT-Verfahren erfüllt werden können.

Kapitel 5

Tab. 5-1: Materialvergleich von Stahl, GFK und PP für die Verwendung in Vortriebsrohren mit dem Außendurchmesser 1.400 mm und einer maximalen Axialkraft von 7.000 kN bei 1,5-facher Sicherheit.

Tab. 5-2: Kostenschätzung für Easy Pipe-System [5-12].

Tab. 5-3: Richtwerte für die Bohrleistung des Easy Pipe-Systems in unterschiedlichen Böden bei 24 Arbeitsstunden pro Tag [5-4, 5-14, 5-15, 5-16].

Tab. 5-4: Abschätzung der erforderlichen LKW-Transporte beim Einsatz des Easy Pipe-Verfahrens (ohne Vortriebsrohre).

Tab. 5-5: Wesentliche Zielvorgaben für ein neues Verlegeverfahren sowie Angaben dazu, inwiefern diese Vorgaben durch das EP-Verfahren erfüllt werden können.

Kapitel 6

Tab. 6-1: Leistungsprofile von HDD, MT und EP.

LITERATURVERZEICHNIS

Kapitel 1

- [1-1] Köhler, R.: Tiefbauarbeiten für Rohrleitungen, Verlagsgesellschaft Rudolf Müller Bau-Fachinformationen GmbH, 1995.
- [1-2] Koch, R.: Technik – Erdgasleitungsbau in der Sowjetunion, Verlag Danies & Koch, Halle/Saale, 2000
- [1-3] Fa. *Herrenknecht AG*, Schwanau: Firmenprospekt Pipe Jacking with Microtunneling, Dec 2002
- [1-4] Fa. *Bohlen & Doyen GmbH*, Wiesmoor: Firmenprospekt
- [1-5] Griesbaum, R., Kögler, R.: Horizontalbohrtechnik oder Microtunneling? bi UmweltBau, Februar 2002

Kapitel 2

- [2-1] Stein, D.: Grabenloser Leitungsbau, Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH und Co. KG, Köln 2003
- [2-2] N.N.: ÖGL – Handbuch grabenlos, Oktober 1993
- [2-3] Köhler, R.: Tiefbauarbeiten für Rohrleitungen, Verlagsgesellschaft Rudolf Müller Bau-Fachinformationen GmbH, 1995
- [2-4] DIN 18319: Rohrvortriebsarbeiten, Dezember 1992
- [2-5] DIN EN 12889: Grabenlose Verlegung und Prüfung von Abwasserleitungen und -kanälen, März 2000
- [2-6] Fa. *Herrenknecht AG*, Schwanau: Firmenprospekt Microtunneling – Trenchless Technology
- [2-7] Babendererde, L., Elsner, Ph., Kleszka, A.: Pipe jack comes to the rescue in Berlin, Tunnels&Tunnelling International, March 2005
- [2-8] Fa. *Herrenknecht AG*, Schwanau: Firmenzeitung Herrenknecht News / Nr. 6/1999
- [2-9] Fa. *Herrenknecht AG*, Schwanau: Firmenzeitung Herrenknecht Aktuell / micro spezial / Nr. 4/97
- [2-10] Fa. *Herrenknecht AG*, Schwanau: Firmenprospekt Service and Logistics / Tunnel Technology from A – Z
- [2-11] Fa. *Herrenknecht AG*, Schwanau: Firmenprospekt Micro-Tunneling . Präzise Rohrverlegung in der geschlossenen Bauweise

- [2-12] Fa. *Herrenknecht AG*, Schwanau: Firmenprospekt Technical Data Sheet / Universal Navigation System, November 2004
- [2-13] Fa. *MAT Mischanlagentechnik GmbH*, Immenstadt-Seifen: Firmenprospekt Das Komplettprogramm
- [2-14] Fa. *Weir Warman Limited*, Artarmon, Australia: Firmeninformation Warman XU Pumps – Medium Duty Slurry Pumps, 2005
- [2-15] Fa. *Herrenknecht AG*, Schwanau: Firmenprospekt Microtunneling
- [2-16] Fa. *Meyer Betonwerk GmbH*, Lüneburg: Firmenprospekt Polycrrete Rohr- und Schachtsysteme
- [2-17] Fa. *Herrenknecht AG*, Schwanau: Firmenprospekt Pipe Jacking with Microtunneling
- [2-18] HDI Horizontal Drilling International s.a.s, Paris, Reference List for Pipelines >30", Update November 2005
- [2-19] DIN 4022 Teil 1: Benennung und Beschreibung von Boden und Fels, September 1987
- [2-20] DIN 18196: Erd- und Grundbau / Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke, Oktober 1988
- [2-21] DIN 18300: Erdarbeiten, Dezember 1992
- [2-22] Griesbaum, R., Kögler, R.: Horizontalbohrtechnik oder Microtunneling? bi UmweltBau, Februar 2002
- [2-23] Gebauer, B.: Rohrpressungen. Unterirdischer Leitungstunnelbau für begehbare Querschnitte. Hoch- und Tiefbau (1991), Heft 11
- [2-24] DCA – Güteschutzverband Horizontalbohrungen e.V.: Horizontal Directional Drilling – Technische Richtlinien des DCA, 2. Auflage, Oktober 2000
- [2-25] Gaile, C.: HDD – Einsatz im Freispiegelkanal, bi UmweltBau, Juli 2003
- [2-26] Fa. *American Augers*, West Salem: Prospekt FM-750 – Drilling Fluid Mixing System
- [2-27] Fa. *Derrick Equipment Company*, Houston: Prospekt Composite Catalog – A complete Line of Solids Control Equipment, April 2003
- [2-28] Fa. *Sperry Sun*, Houston: Firmenprospekt
- [2-29] Fa. *DrillTec GUT GmbH*, Deggendorf: Firmenprospekt
- [2-30] Kögler, R., Man, A., Xuefeng, T.: Neuer Weltrekord im HDD, bi UmweltBau, Juli 2002
- [2-31] Kögler, R., Man, A., Xuefeng, T.: Chinese World Record Claim for HDD, No-Dig International, September 2002
- [2-32] Gänger, J., Kögler, R.: Ultralange Horizontalbohrungen – eine Herausforderung an das HDD, 3R international, Heft 6, 2000
- [2-33] Fa. *Herrenknecht AG*, Schwanau: Technical Data Sheet / AVN 250 XC – AVN 700 AC

- [2-34] Fa. *Herrenknecht AG*, Schwanau: Technical Data Sheet / AVN 800 XC – AVN 2000 AC
- [2-35] Fa. *Herrenknecht AG*, Schwanau: Technical Data Sheet / AVN 1200 TC – AVN 1800 TC
- [2-36] Fa. *Herrenknecht AG*, Schwanau: Technical Data Sheet / AVN 1200 TB – AVN 1800 TB
- [2-37] Fa. *Herrenknecht AG*, Schwanau: Technical Data Sheet / AVN 1600 AB – AVN 2000 AB
- [2-38] Kögler, R., Lübbers, H.: Dimensionierung von Bohrgeräten für gesteuerte Horizontalbohrungen, bi UmweltBau, Oktober 2001
- [2-39] Fa. *Herrenknecht AG*, Schwanau: Firmenprospekt HDD Rigs: Maximum Pullforce

Kapitel 3

- [3-1] Stein, D.: Grabenloser Leitungsbau, Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH und Co. KG, Köln 2003
- [3-2] Griesbaum, R., Kögler, R.: Horizontalbohrtechnik oder Microtunneling? bi UmweltBau, Februar 2002
- [3-3] DIN 18319: Rohrvortriebsarbeiten, Dezember 1992
- [3-4] Toepfer, A.C.: Einführung in die ATV DIN 18319 „Rohrvortriebsarbeiten“ der VOB Teil C, Tiefbau, Oktober 1994
- [3-5] HDI Horizontal Drilling International s.a.s, Paris, Reference List for Pipelines >30“, Update November 2005
- [3-6] DIN 4022: Baugrund und Grundwasser; Benennen und Beschreiben von Boden und Fels, September 1987
- [3-7] DIN 18123: Baugrund; Untersuchung von Bodenproben – Bestimmung der Korngrößenverteilung, April 1983
- [3-8] DIN 18300: Erdarbeiten, Dezember 1992

Kapitel 4

- [4-1] Breig, U.: Horizontal Directional Drilling im PPT-Verfahren, Vortrag, 18. Oldenburger Rohrleitungsforum, 2003
- [4-2] Breig, U., Kögler, R., Broomfield, J.: PPT – The Combination of HDD and Microtunneling, Vortrag, No-Dig New Orleans, 22.-24.03.2004
- [4-3] Hair, J.D., Capozzoli, L.J.: Installation of Pipelines by Horizontal Directional Drilling Study for American Gas Association, 15. 4. 1995

- [4-4] Nederlandse Normalisatie-instituut: Aanvullende eisen voor stalen leidingen in kruisingen met belangrijke waterstaatswerken, NEN 3651, August 1994
- [4-5] Dickas, G., Sawalies, W.: Microvortrieb im rheinischen Kies in Köln, TIS, Mai 1990
- [4-6] Kögler, R., Lübbers, H.: Dimensionierung von Bohrgeräten für gesteuerte Horizontalbohrungen, bi UmweltBau, Oktober 2001
- [4-7] Stein, D.: Grabenloser Leitungsbau, Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH und Co. KG, Köln 2003
- [4-8] Osumi, T.: Proposed New Formulas to Calculate Jacking Forces, No-Dig International, July 2000
- [4-9] Institut Francais du Petrole Publications: drilling data handbook, Edition Technip Seventh edition, 1999
- [4-10] Kögler, R.: Optimierung von Bohrprogrammen für steuerbare Horizontalbohrungen in sandigen Böden zum Zwecke der Rohrverlegung unter Hindernissen, Dissertation, RWTH Aachen, 1996
- [4-11] Verband Güteschutz Horizontalbohrungen: Richtlinien für Bohrgestänge, Bohrmeisterschule Celle, 2000
- [4-12] Mannesmannröhren-Werke: Rohre für Öl- und Gasfelder / Drillpipe, Firmenbroschüre, September 1977
- [4-13] Schaumberg, G.: Bohrstrang für HDD Bohrungen, Deutsche Bohrmeisterschule, Dezember 1996
- [4-14] Fa. Grant Prideco: Firmeninformation Drilling Products & Services, 2006
- [4-15] DCA – Güteschutzverband Horizontalbohrungen e.V.: Horizontal Directional Drilling – Technische Richtlinien des DCA, 2. Auflage, Oktober 2000
- [4-16] Werner, V.: 1996 Review of HDD Tracking Systems, Directional Drilling, September 1996
- [4-17] Bueno, S.M.: 1998 Review of HDD Walkover & Downhole Tracking Systems, Directional Drilling, Februar 1997
- [4-18] Fa. *Sharewell Directional Drilling Systems*: Magnetic Guidance System, Firmeninformation
- [4-19] Fa. *Sharewell Directional Drilling Systems*: TruTracker, Firmeninformation
- [4-20] Fa. *Prime Horizontal Ltd.*: Case Histories, Firmeninformation
- [4-21] Unruh, H.: Steuer- und Meßtechnik für flüssigkeitsunterstützte, gesteuerte Horizontalbohrungen zur Leitungsverlegung, Diplomarbeit an der Fachhochschule Oldenburg, Februar 1997
- [4-22] Cooper, G.A.: Directional Drilling, Scientific American, May 1994

- [4-23] Fa. *Tensor Steering Tool System*: Operations Manual, Release 3.3
- [4-24] Fa. *R. Schäfer & Urbach GmbH & Co. KG*: Schäfer & Urbach Triplexpumpe für Bentonit-Suspension, Firmeninformation
- [4-25] Elbe, L.: Bohrspülungen im HDD, Schriftenreihe aus dem Institut für Rohrleitungsbau Oldenburg, Bd. 26, Vulkan-Verlag Essen
- [4-26] Fa. *BAUER Maschinenbau GmbH*, Schrobenuhausen: BE Entsandungsanlagen, Firmeninformation, März 2003
- [4-27] Fa. *Herrenknecht AG*, Schwanau: Abteilung Micromaschinen, Entwurfszeichnung PPT, 2003
- [4-28] Autorenteam des Ausschusses Normenpraxis: DIN Deutsches Institut für Normung Europäische Stahlsorten – Bezeichnungssystem und DIN-Vergleich, 2001
- [4-29] Fa. *Herrenknecht AG*, Schwanau: Abteilung HDD, Entwurfszeichnung Pipe Thruster, 2004
- [4-30] Arbeitskreis der Ruhrgas AG: Horizontal Drilling – Richtlinien zur Werksseitigen Umhüllung von Stahlrohren, November 1996
- [4-31] Arbeitskreis der Ruhrgas AG, Horizontal Drilling – Richtlinien zur Vervollständigung der Umhüllung an der Baustelle, November 1996
- [4-32] Fa. *Rohrwerke Muldenstein GmbH*: Firmeninformation Qualitätsrohre mit System
- [4-33] DIN 30670: Umhüllung von Stahlrohren und Formstücken mit Polyethylen, April 1991
- [4-34] DIN 30671: Umhüllung (Außenbeschichtung) von erdverlegten Stahlrohren mit Duroplasten, Juni 1992
- [4-35] DIN 30678: Umhüllung von Stahlrohren mit Polypropylen, Oktober 1992
- [4-36] Wossog, G. (Herausgeber): Handbuch Rohrleitungsbau, Band I: Planung, Herstellung, Errichtung, Vulkan-Verlag Essen, 1998
- [4-37] DVGW Regelwerk: Technische Regeln – Arbeitsblatt GW 340, FZM-Ummantelung zum mechanischen Schutz von Stahlrohren und -formstücken mit Polyolefinumhüllung, April 1999
- [4-38] Richter, D.: Allgemeine Geologie, Sammlung Göschen, De Gruyter, 1980
- [4-39] Schmidt, K.: Erdgeschichte, Sammlung Göschen, De Gruyter, 1980
- [4-40] Dierke Weltatlas: Deutschland / Mitteleuropa – Geologie, Georg Westermann Verlag, 1977
- [4-41] Fa. *Inrock Drilling Systems, Inc.*: Inrock Product Bulletin, 1997
- [4-42] Fa. *WELLDONE Engineering GmbH*: Firmeninformation „Drehwirbel“, Technische Daten

- [4-43] Fa. *DCD Design & Manufacturing Ltd.*: Firmeninformation „Quality Engineered Pullback Tools“, Technische Daten
- [4-44] Simmer, K.: Grundbau 1 – Bodenmechanik, Erdstatische Berechnungen, B.G.Teubner Stuttgart, 1980
- [4-45] Schaumberg, G.: Bohrlochhydraulik für HDD Bohrungen, Deutsche Bohrmeisterschule Celle, 1997
- [4-46] Fa. *Weir Warman Limited*, Artarmon, Australia: Firmeninformation Warman XU Pumps – Medium Duty Slurry Pumps, 2005
- [4-47] Fa. *Weir Warman Limited*, Artarmon, Australia: Firmeninformation Hazelton SHW Submersible Pump, 2005
- [4-48] Fa. *Weir Warman Limited*, Artarmon, Australia, Firmeninformation Horizontal Slurry Pumps, 2005
- [4-49] Fa. *Habermann GmbH & Co. KG*: Firmeninformation NPK/NP/NPW, 2005
- [4-50] Fa. *Weir Warman Limited*, Artarmon, Australia: Firmeninformation Warman AH Heavy Duty Slurry Pumps, 2005
- [4-51] Arnold, W. (Herausgeber): Flachbohrtechnik: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig-Stuttgart, 1993
- [4-52] Fa. *WIRTH Maschinen- und Bohrergeräte-Fabrik GmbH*, Erkelenz: Bohrtechnisches Handbuch, Version 1.0, 2002
- [4-53] Tudeszki, H., Rossbach, S., Lehrling, G.: Hydropneumatische Feststoffförderung beim HDD-Bohrverfahren und Microtunneling, Präsentation, November 2004
- [4-54] Großmann, U.: Hydraulischer Feststofftransport in geneigten und horizontalen Ringräumen während des Bohrprozesses, Mitteilung aus dem Institut für Tiefbohrtechnik, Erdöl- und Erdgasgewinnung (ITE) der Technischen Universität Clausthal, Januar 1988

Kapitel 5

- [5-1] Kögler, R., John, H.J., Breig, U., Schmäh, P.: Die grabenlose Kombilösung, bi UmweltBau, Juni 2005
- [5-2] Fa. *Herrenknecht AG*, Schwanau: Entwurfszeichnungen für Easy Pipe, 2005
- [5-3] Fa. *Herrenknecht AG*, Schwanau: Technical Data Sheet / AVN 1200 TC – AVN 1800 TC
- [5-4] Stein, D.: Grabenloser Leitungsbau, Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH und Co. KG, Köln2003

- [5-5] Osumi, T.: Proposed New Formulas to Calculate Jacking Forces, No-Dig International, July 2000
- [5-6] Fa. *Herrenknecht AG*, Schwanau: Fotoarchiv, 2005
- [5-7] Fa. *Herrenknecht AG*, Schwanau: Firmenprospekt Technical Data Sheet / Universal Navigation System, November 2004
- [5-8] Fa. *Herrenknecht AG*, Schwanau: Prinzipskizzen zum Easy Pipe Verfahren, 2006
- [5-9] Fa. *HOBAS AG*, Schweiz: Firmeninformation, 2000
- [5-10] Fa. *Karl Schöngen KG*, Salzgitter: Firmeninformation Kunststoff Rohrsysteme, 2000
- [5-11] DIN EN 1852-1: Kunststoff-Rohrleitungssysteme für erdverlegte Abwasserkanäle und –leitungen aus Polypropylen, 1997
- [5-12] Wossog, G. (Herausgeber): Handbuch Rohrleitungsbau, Band I: Planung, Herstellung, Errichtung, Vulkan-Verlag Essen, 1998
- [5-13] Fa. *Herrenknecht AG*, Schwanau: Produktinformationen zum Easy Pipe-Verfahren, 2006
- [5-14] Fa. *Züblin (Asia) Co., Ltd.*, Bangkok: Leistungsschätzung zum Easy Pipe-Verfahren, 2006
- [5-15] Fa. *Herrenknecht AG*, Schwanau: Leistungsschätzung zum Easy Pipe-Verfahren, 2006
- [5-16] Fa. *Meyer & John GmbH & Co. KG*, Hamburg: Leistungsschätzung zum Easy Pipe-Verfahren, 2006